



# Pengukuran Besaran Listrik

*copyright* © Riky Dwi Puriyanto, S.T., M.Eng. & Phisca Aditya Rosyady, S.Si., M.Sc.

ISBN: 9786236071113

Editor: Budi Ashari

Layout: Ratih Purwandari, Syifa Khoirunnisa

Cover: Hafidz Irfana

Penerbit: **UAD Press**

Kantor : Lembaga Penerbitan dan Publikasi Ilmiah

Universitas Ahmad Dahlan

Kampus 4, Jln. Ringroad Selatan Yogyakarta

Telp. 0274-379418 Ext. 4902

Cetakan pertama, Mei 2021

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

## DAFTAR PUSTAKA

Purkait, P., Biswas, B., Das, S. & Koley, C., 2013. Electrical and Electronics Measurements and Instrumentation. New Delhi: McGraw Hill Education (India) Private Limited.

# KATA PENGANTAR

## LATIHAN

1. Konstanta meteran dari 110 V, 5 meteran energi adalah 2000 putaran per kWh. Meteran diuji pada setengah beban pada tegangan pengenal dan faktor daya unity. Meteran ditemukan membuat 34 revolusi dalam 116 detik Tentukan kesalahan meter pada setengah beban.
2. Tegangan 230 V dan arus 5 A, energi pada uji faktor daya kesatuan beban penuh menghasilkan 60 putaran dalam 360 detik. Jika kecepatan disk yang dirancang adalah 520 putaran per kWh, temukan kesalahan persentase!
3. Jelaskan 2 penyebab variasi tegangan dapat menyebabkan kesalahan dalam energi meter tipe induksi !
4. Jelaskan efek kelebihan beban dalam energy meter tipe induksi. Bagaimana efek ini bisa dihindari?
5. A 220 V, 10 A energy meter DC diuji untuk peringkat plat namanya. Resistansi rangkaian kumparan tekanan adalah  $8000 \Omega$  dan kumparan arus itu sendiri adalah  $0,12 \Omega$ . Hitung energi yang dikonsumsi saat pengujian untuk periode 1 jam dengan :
  - (a) Pengaturan pemuatan langsung
  - (b) Pemuatan phantom dengan rangkaian kumparan saat ini tereksitasi oleh baterai 9 V terpisah

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas karunia-Nya sehingga buku Pengukuran Besaran Listrik ini bisa terbit dan tersaji di depan para pembaca. Buku ini adalah wujud iktidar dari penulis untuk menjelaskan kepada mahasiswa khususnya untuk menggunakan alat ukur listrik yang digunakan sebagai dasar pengukuran besaran listrik. Buku ini diperuntukkan untuk mahasiswa diploma ataupun sarjana di bidang Teknik Elektro.

Buku ini merupakan pengembangan dari Rancangan Pembelajaran Semester (RPS) Program Studi Teknik Elektro di kampus Universitas Ahmad Dahlan yang sudah digunakan dalam pembelajarannya. Penulis menyajikan secara rinci dan sistematis sehingga akan memudahkan pembaca dalam memahami. Sajian materi buku ini meliputi: Konsep Dasar Pengukuran, Teori Pengukuran, Alat Ukur Analog, Pengukuran Hambatan, Jembatan AC, Pengukuran Daya, dan Pengukuran Energi. Materi utama yang disampaikan pada buku ajar ini diambil dan diterjemahkan dari Buku Electrical and Electronics Measurement and Instrumentation dan pengembangan dari sumber lain yang mendukung. Disetiap akhir bab dan bab penutup juga terdapat soal-soal latihan sebagai pendalaman materi.

Harapannya dengan kehadiran buku ini semoga bisa sebagai pegangan dan referensi mahasiswa dalam mempelajari mata kuliah Pengukuran Besaran Listrik yang relevan dan disajikan secara sistematis. Akhirnya Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pimpinan UAD, LPPI UAD, dan kawan-kawan Dosen Teknik Elektro UAD atas dukungan dan bantuannya dalam penyusunan buku ini. Penulis juga menyampaikan permohonan maaf jika ada kekurangan dan kesalahan dalam penyusunan buku ini. Saran dan kritik sangat kami harapkan dan bisa disampaikan melalui email Penulis, rikydp@ee.uad.ac.id dan phiscaaditya@ee.uad.ac.id.

Yogyakarta, Agustus 2020

Penulis

# DAFTAR ISI

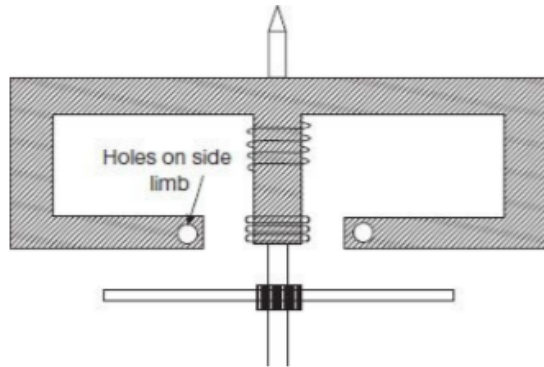
KATA PENGANTAR .....	3
BAB I KONSEP DASAR PENGUKURAN .....	9
1.1. PENDAHULUAN .....	9
1.2. SISTEM SATUAN .....	11
1.3. BESARAN LISTRIK.....	12
1.3.1. Muatan dan Arus.....	12
1.3.2. Beda Potensial .....	15
1.3.3. Gaya Listrik .....	16
1.3.4. Medan Listrik.....	17
1.3.5. Resistansi dan Resistivitas .....	17
1.3.6. Kapasitansi dan Induktansi .....	18
KESIMPULAN.....	19
LATIHAN SOAL .....	19
BAB II TEORI PENGUKURAN .....	21
2.1. PENDAHULUAN .....	21
2.2. ALAT UKUR.....	24
2.2.1. Akurasi dan Presisi .....	26
2.2.2. Standar Pengukuran dan Standar Listrik .....	27
2.3. KESALAHAN DALAM PENGUKURAN .....	28
2.3.1. Kesalahan Umum ( <i>Gross Error</i> ) .....	29
2.3.2. Kesalahan Sistematis ( <i>Systematic Error</i> ) .....	29
2.3.3. Kesalahan Acak ( <i>Random Error</i> ) .....	30
2.4. ANALISIS STATISTIK .....	31
2.5. KEMUNGKINAN KESALAHAN.....	32
2.6. EFEK PEMBEBANAN .....	35
KESIMPULAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

kondisi uji laboratorium. Dalam kasus seperti itu, untuk menghindari hal ini, pengaturan muatan ‘phantom’ atau ‘fiktif’ dilakukan untuk pengujian energi meter.

Pembebanan phantom terdiri dari memasok rangkaian koil tekanan magnet *shunt* dari sumber tegangan shunt. Koil arus magnet seri dipasang dari sumber pasokan tegangan rendah yang terpisah. Dimungkinkan untuk menyirkulasikan arus *shunt* melalui sirkuit kumparan arus dengan sumber tegangan rendah karena impedansi sirkuit ini sangat rendah. Energi yang ditunjukkan oleh meteran dalam kondisi beban hantu sama dengan indikasi energi seperti pada beban sebenarnya. Dengan pengaturan ini, total energi yang dikonsumsi untuk pengujian ini relatif lebih kecil. Total energi yang diperlukan untuk pengujian ini adalah karena arus kumparan tekanan kecil pada tegangan shunt dan tegangan kumparan arus kecil pada arus *shunt*.

## KESIMPULAN

1. Energi adalah total daya yang dikonsumsi selama interval waktu tertentu, yaitu  $Energi = Daya \times Waktu$ .
2. Unit energi dapat dinyatakan dalam satuan Joule atau Watt-second atau Watt-hour sesuai kenyamanan. Unit yang lebih besar yang paling sering digunakan adalah kilowatt-jam (kWh), yang didefinisikan sebagai energi yang dikonsumsi ketika daya dikirim pada tingkat rata-rata 1 kilowatt selama satu jam.



Gambar 7.13 Lubang yang disediakan pada tungkai samping untuk mengkompensasi kesalahan karena variasi tegangan mendadak

## 7.4 Pengujian Energi Meter

Energi meter diuji pada kondisi berikut:

1. Pada 5% dari nilai arus pada faktor daya satu
2. Pada 100% atau 125% dari arus shunt dengan faktor daya satu
3. Pada satu beban menengah dengan faktor daya satu
4. Pada nilai arus dan 0,5 faktor daya lagging
5. Uji creep Dengan kumparan tekanan yang disuplai dengan tegangan rated 110% dan kumparan arus terbuka, cakram meter tidak boleh diputar lebih dari satu putaran, Seharusnya cakram tidak merangkak
6. Uji awal Pada 0,5% dari arus rated dan tegangan rated penuh, cakram meter harus mulai berputar

### 7.4.1 Memuat Phantom

Ketika arus meteran sedang diuji tinggi, tes dengan pengaturan beban aktual akan melibatkan pemborosan energi yang cukup besar dan juga sulit untuk mengatur beban besar seperti itu dalam

LATIHAN SOAL .....	38
BAB III ALAT UKUR ANALOG .....	39
3.1. PENDAHULUAN .....	39
BAB IV PENGUKURAN HAMBATAN .....	74
4.1. PENDAHULUAN .....	74
4.2. PENGUKURAN RESISTANSI SEDANG .....	74
4.2.1. Metode Ohmmeter .....	75
4.2.2. Metode Voltmeter-Ampermeter .....	82
4.2.3. Metode Jembatan Wheatstone .....	85
4.3. Pengukuran Resistansi Rendah .....	88
4.3.1. Metode Voltmeter-Ampermeter .....	89
4.3.2. Metode Jembatan Ganda Kelvin ( <i>Kelvin's Double Bridge</i> )	90
4.3.3. Metode Potensiometer .....	94
4.4. PENGUKURAN RESISTANSI TINGGI.....	96
4.5. PENENTUAN LOKASI GANGGUAN KABEL.....	<b>Error!</b>
	<b>Bookmark not defined.</b>
KESIMPULAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
LATIHAN SOAL .....	100
BAB V JEMBATAN AC .....	102
5.1. PENDAHULUAN .....	102
5.2. PERSAMAAN UMUM.....	102
5.3. PENGUKURAN INDUKTANSI DALAM .....	106
5.3.1 Jembatan Maxwell .....	106
5.3.2 Jembatan Maxwell Kapasitansi-Induktansi .....	109
5.3.3 Jembatan Hay.....	115
5.3.4 Jembatan Anderson.....	118
5.3.5 Jembatan Owen.....	122
5.4 Pengukuran Kapasitansi.....	127

5.4.1 Jembatan De Sauty .....	130
5.4.2 Jembatan Schering .....	135
5.5 Pengukuran Frekuensi .....	138
<b>BAB VI PENGUKURAN DAYA</b> .....	<b>143</b>
6.1 Pengukuran Daya Dalam Rangkaian DC .....	143
6.2 Pengukuran Daya Dalam Rangkaian AC .....	151
6.3 Wattmeter Tipe Electrodynamometer.....	153
6.3.1 Konstruksi Elektrodinamometer Tipe Wattmeter.....	154
6.3.2 Operasi Elektrodinamometer Tipe Wattmeter.....	158
6.3.3 Bentuk Skala pada Elektrodinamometer Tipe Wattmeter.....	161
6.3.4 Error pada Elektrodinamometer Tipe Wattmeter .....	162
6.4 Pengukuran Daya Dalam Sistem 3 Fase.....	173
6.4.1 Sistem tiga fasa tiga pengkabelan.....	173
6.4.2 Metode Dua-Wattmeter .....	174
6.4.3 Sistem koneksi star .....	175
6.4.4 Sistem Koneksi-Delta .....	176
6.4.5 Pengaruh Faktor Daya pada Pembacaan Wattmeter.....	177
6.4.6 Power Faktor per satuan .....	180
6.4.7 0.5 Power Faktor.....	180
6.4.8 0 Power Faktor.....	180
6.5 Pengukuran Daya Reaktif.....	182
<b>BAB VII PENGUKURAN ENERGI</b> .....	<b>187</b>
7.1 Pendahuluan.....	187
7.2 Induksi Fase Tunggal Tipe Energi Meter .....	188
7.2.1 Teori Dasar Meter Induksi.....	188
7.2.2 Rincian Konstruksional Energi Meter Tipe Induksi.....	192
7.2.3 Pengoperasian Energi meter Tipe Induksi.....	197
7.3 Kesalahan Dalam Energi meter Jenis Induksi dan Kompensasi .....	202

magnet seri untuk mengompensasi kesalahan kelebihan pada nilai arus tinggi.

### 7.3.6 Kesalahan karena Variasi Tegangan

Variasi tegangan dapat menyebabkan kesalahan dalam energi meter tipe induksi terutama karena dua alasan:

1. Pada tegangan terlalu tinggi, hubungan antara tegangan suplai  $V$  dan fluks magnet shunt  $\phi_p$  tidak lagi linier karena saturasi bagian besi.
2. Untuk fluktuasi tegangan suplai yang tiba-tiba, fluks magnet shunt  $\phi_p$  menghasilkan ggl yang diinduksi secara dinamis dalam disk yang pada gilirannya menghasilkan torsi pengereman sendiri dan rotasi disk terhambat.

Kompensasi untuk variasi tegangan disediakan dengan menggunakan shunt magnetik yang cocok yang mengalihkan sebagian besar fluks melalui disk ketika voltase naik, sehingga meningkatkan torsi penggerak untuk mengatasi torsi pengereman otomatis. Kompensasi semacam itu dapat dicapai dengan meningkatkan keengganan tungkai samping dari magnet shunt. Ini dilakukan dengan memberikan lubang pada tungkai samping seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.13.

### 7.3.5 Kesalahan karena Kelebihan

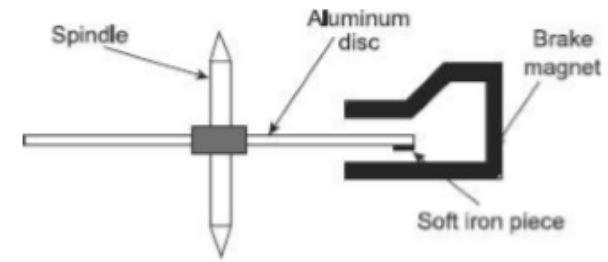
Pada tegangan konstan, torsi membelokkan menjadi sebanding dengan fluks magnet seri dan karenanya sebanding dengan arus beban. Ini disebabkan oleh fakta bahwa dari Persamaan. (7.2), pada tegangan konstan karena fluks magnet shunt  $\varphi_p$  konstan, torsi penggerak  $T_d \propto \varphi_s \propto I$ .

Di sisi lain, ketika disk berputar terus menerus di bidang magnet seri, GGL (Gaya Gerak Listrik) diinduksi secara dinamis dalam disk karena hubungannya dengan fluks magnet seri  $\varphi_s$ . GGL ini menginduksi arus eddy dalam disk yang berinteraksi dengan fluks magnet seri untuk membuat torsi perlambatan atau pengereman yang berlawanan dengan gerakan disk. Torsi pengereman sendiri ini sebanding dengan kuadrat fluks magnet seri atau sebanding dengan kuadrat arus beban; yaitu,  $T_b \propto \varphi_s^2 \propto I^2$ .

Pada beban yang lebih tinggi, dengan demikian torsi rem melebihi torsi yang membelokkan dan meteran cenderung berputar pada kecepatan yang lebih lambat, dan akibatnya membaca energi lebih rendah dari yang sebenarnya.

Untuk menghindari kesalahan seperti itu, dan untuk meminimalkan tindakan pengereman otomatis, kecepatan beban penuh disk ditetapkan pada nilai yang lebih rendah. Fluks koil arus dibuat lebih kecil dibandingkan dengan fluks koil tekanan  $\varphi_p$ . Dengan demikian, GGL yang diinduksi secara dinamis yang menyebabkan torsi pengereman dibatasi dibandingkan dengan torsi penggerak. Shunt magnet terkadang juga digunakan dengan

7.3.1	Kesalahan fase-sudut .....	202
7.3.2	Kesalahan karena Gesekan pada Beban Ringan.....	206
7.3.3	Kesalahan Merayap .....	207
7.3.4	Kesalahan karena Perubahan Suhu.....	209
7.3.5	Kesalahan karena Kelebihan.....	210
7.3.6	Kesalahan karena Variasi Tegangan.....	211
7.4	Pengujian Energi Meter .....	212
7.4.1	Memuat Phantom.....	212
DAFTAR PUSTAKA.....		215
GLOSARIUM.....		<b>Error! Bookmark not defined.</b>
INDEKS.....		<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tentang Penulis .....		<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tentang UAD Press .....		<b>Error! Bookmark not defined.</b>



Gambar 7.12 Bagian besi lunak di ujung cakram untuk mencegah creeping

### 7.3.4 Kesalahan karena Perubahan Suhu

Kesalahan yang disebabkan oleh variasi suhu dalam energi meter tipe induksi biasanya kecil karena berbagai efek cenderung menetralkan satu sama lain. Peningkatan suhu akan meningkatkan resistansi koil tekanan, sehingga mengurangi arus koil tekanan dan mengurangi fluks koil tekanan. Ini akan cenderung mengurangi torsi penggerak. Tetapi fluks magnet rem juga berkurang karena kenaikan suhu, sehingga mengurangi torsi pengereman. Sekali lagi, peningkatan suhu meningkatkan ketahanan terhadap lintasan arus eddy di cakram, yang mengurangi torsi penggerak dan torsi pengereman. Dengan demikian, berbagai efek cenderung saling menetralkan.

Efek peningkatan suhu, bagaimanapun, secara umum menyebabkan meteran berputar lebih cepat dan karenanya mencatat nilai yang lebih tinggi. Efek suhu karenanya perlu dikompensasi dengan menggunakan shunt suhu di magnet rem.



bergerak merayap mungkin adalah torsi berlebih di seluruh koil potensial yang menghasilkan produksi torsi berlebihan oleh alat kompensasi gesekan, atau getaran, dan medan magnet yang tersesat.

Piringan merayap dapat dihindari dengan mengebor dua lubang pada cakram aluminium yang ditempatkan pada lokasi yang berlawanan secara diametris. Pengeboran lubang tersebut akan mendistorsi jalur arus eddy di sepanjang cakram dan akan cenderung berhenti dengan lubang yang berada di bawah kutub magnet shunt. Dengan demikian cakram hanya dapat merayap hingga setengah putaran hingga salah satu lubang berada di bawah kutub magnet yang melangsir. Efek ini bagaimanapun, terlalu kecil untuk menghambat pergerakan cakram selama operasi berjalan normal di bawah beban.

Piringan merayap juga dapat dihindari dengan menempelkan sepotong kecil besi di tepi cakram. Magnet rem dalam kasus seperti itu dapat mengunci bagian besi itu sendiri dan mencegah piringan merayap. Sekali lagi, tindakan ini terlalu kecil untuk menghambat pergerakan *disk* (cakram) selama operasi normal berjalan di bawah beban. Pengaturan ini secara skematis ditunjukkan pada Gambar 7.12.

# BAB I

## KONSEP DASAR PENGUKURAN

### 1.1. PENDAHULUAN

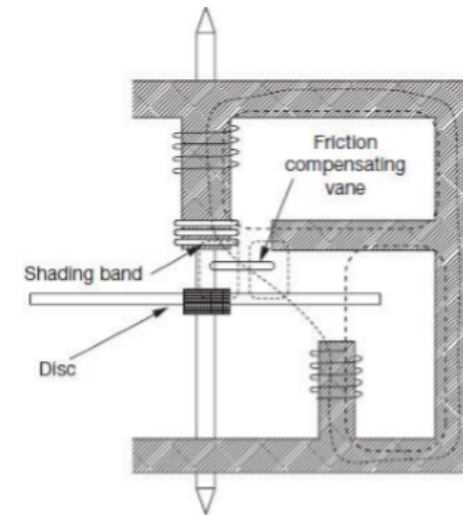
Pengukuran merupakan sebuah kegiatan, atau hasil, perbandingan kuantitatif antara besaran yang diberikan dengan besaran lain sejenis yang disebut sebagai satuan. Hasil pengukuran dinyatakan melalui defleksi penunjuk/ *pointer* pada skala yang sudah ditentukan atau angka yang mewakili rasio antara besaran yang tidak diketahui dengan standarnya. Standar didefinisikan sebagai personifikasi/ perlambangan satuan pengukuran atau nilai penggantinya. Alat ukur atau instrumen ukur digunakan untuk membandingkan besaran yang tidak diketahui dengan satuan pengukuran atau nilai standar yang disebut sebagai alat ukur. Nilai dari besaran yang tidak diketahui dapat diukur dengan metode langsung maupun tidak langsung. Pada metode pengukuran langsung, besaran yang tidak diketahui diukur secara langsung daripada dibandingkan dengan standar. Contoh pengukuran langsung adalah pengukuran arus dengan ammeter, tegangan dengan voltmeter, resistansi dengan ohmmeter, daya dengan wattmeter, dan lainnya. Pada metode pengukuran tidak langsung nilai besaran yang tidak diketahui ditentukan dengan mengukur kuantitas yang terkait secara fungsional dan menghitung ke bentuk besaran yang diinginkan daripada mengukurnya secara langsung. Dianggap resistansi sebuah konduktor adalah  $R$  dapat diukur dengan mengukur drop tegangan yang melalui konduktor dan membagi tegangan ( $V$ ) dengan arus ( $I$ ) yang melalui konduktor seperti pada persamaan 1.1.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.1)$$

Pengukuran besaran listrik tidak dapat lepas dari adanya komponen elektronika yang menyebabkan fenomena-fenomena kelistrikan. Fenomena kelistrikan inilah yang akan diukur menggunakan alat ukur tertentu sesuai dengan karakteristiknya. Sebelum membahas lebih jauh tentang pengukuran, kita perlu memahami terlebih dahulu tentang konsep dasar rangkaian listrik. Teori rangkaian listrik dan teori elektromagnetik merupakan dua teori dasar yang membentuk semua cabang ilmu di bidang teknik elektro. Cabang ilmu teknik elektro seperti arus kuat (*power*), mesin listrik, kendali, elektronika, telekomunikasi dan instrumentasi semua berbasis teori rangkaian listrik. Maka dari itu penting bagi kita mengawali pembelajaran ini dari teori dasar rangkaian listrik.

Pada bidang teknik elektro, kita sering melakukan kegiatan transfer energi dari satu titik ke titik yang lain. Untuk melakukannya kita perlu menghubungkan peralatan listrik. Hubungan semacam itu disebut sebagai rangkaian listrik, sedangkan masing-masing komponen pada rangkaian listrik disebut sebagai elemen. Maka dapat dikatakan bahwa rangkaian listrik adalah hubungan antara elemen-elemen listrik. Contoh rangkaian listrik dapat dilihat pada Gambar 1.1. Gambar 1.1 merupakan rangkaian untuk menhidupkan LED menggunakan baterai. Terdapat 3 elemen dari rangkaian listrik tersebut, yaitu baterai, LED dan kabel penghubung.

yang ditunjukkan pada Gambar 7.11. Interaksi antara fluks yang dihubungkan dan tidak dihubungkan oleh baling-baling shading atau kompensasi dan arus yang mereka sebabkan dalam disk menghasilkan torsi penggerak kecil yang dapat mengimbangi torsi perlambatan gesekan. Nilai torsi tambahan kecil ini dapat disesuaikan dengan gerakan lateral baling-baling masuk dan keluar dari posisinya di celah udara.

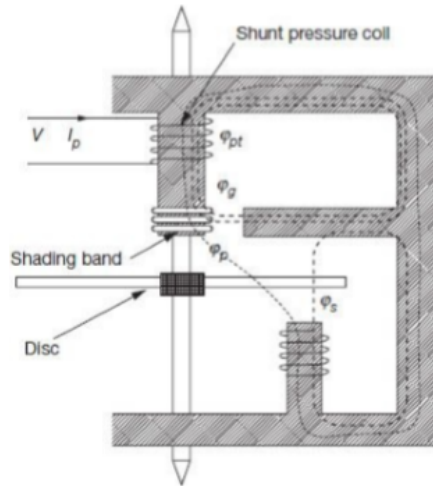


Gambar 7.11 Shading baling-baling untuk kompensasi gesekan

### 7.3.3 Kesalahan Merayap

Dalam beberapa meteran, rotasi disk yang lambat namun berkelanjutan dapat diamati bahkan ketika tidak ada arus yang mengalir melalui koil saat ini, dan hanya koil tekanan yang diberi energi. Ini disebut creeping (kondisi merayap). Alasan utama merayap adalah karena kompensasi berlebihan untuk gesekan. Meskipun torsi utama tidak ada beban, torsi tambahan yang disediakan oleh baling-baling kompensasi gesekan akan membuat disk (cakram) terus berputar. Penyebab lain dari piringan yang

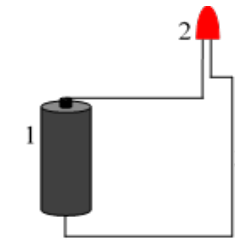
antara tegangan suplai  $V$  dan fluks magnet shunt yang dihasilkan  $\varphi_p$  tepatnya  $90^\circ$ .



Gambar 7.10 Pita shading tembaga untuk pengaturan

### 7.3.2 Kesalahan karena Gesekan pada Beban Ringan

Gesekan pada bantalan dapat menimbulkan kesalahan serius dalam pengukuran energi dalam bentuk yang akan menghambat gerakan yang tepat dari disk yang berputar. Masalah ini khususnya tidak dapat diterima pada beban rendah, ketika torsi penggeraknya sendiri sangat rendah; oleh karena itu, torsi gesekan yang tidak diinginkan bahkan dapat menghentikan disk berputar. Untuk menghindari hal ini, perlu untuk memberikan torsi tambahan yang pada dasarnya tidak tergantung pada beban, untuk diterapkan ke arah torsi penggerak, misalnya, berlawanan dengan torsi gesekan untuk mengimbangi torsi perlambatan gesekan. Ini dicapai dengan menggunakan baling-baling kecil atau lingkaran teduh yang ditempatkan di celah udara antara tungkai pusat magnet shunt dan piringan aluminium, dan sedikit di luar pusat tungkai pusat, seperti



Gambar 1.1. Rangkaian listrik sederhana

## 1.2. SISTEM SATUAN

Dalam melakukan pengukuran terhadap suatu besaran kita dapat merepresentasikan hasil pengukuran dalam berbagai satuan. Untuk berkomunikasi dengan orang lain di seluruh dunia, perlu adanya kesepakatan dalam menyatakan suatu besaran hasil pengukuran agar dapat diterima dan dipahami. Di bidang teknik elektro menggunakan sistem Satuan Internasional (SI) yang dihasilkan pada General Conference on Weights and Measures pada tahun 1960. Pada sistem satuan ini terdapat tujuh satuan dasar yang menyatakan besaran fisik dan dapat diturunkan menjadi besaran turunan. Tabel 1.1 menunjukkan jenis satuan berdasarkan sistem SI.

Tabel 1.1. Satuan SI standar

Besaran	Satuan	Simbol
Panjang	meter	m
Berat	kilogram	kg
Waktu	second	s
Arus listrik	ampere	A
Suhu	kelvin	K
Intensitas cahaya	candela	cd
Muatan	coulomb	C

Dalam satuan SI terdapat prefix yang merupakan faktor pengali 10 yang berfungsi untuk menyederhanakan nilai hasil pengukuran dalam

bentuk yang lebih sederhana. Tabel 1.2 menunjukkan jenis prefix yang biasa digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

Tabel 1.2. Prefix dalam satuan SI

Pengali	Prefix	Simbol
$10^{18}$	exa	E
$10^{15}$	penta	P
$10^{12}$	tera	T
$10^9$	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^2$	hecto	h
10	deka	da
$10^{-1}$	deci	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

## 1.3. BESARAN LISTRIK

### 1.3.1. Muatan dan Arus

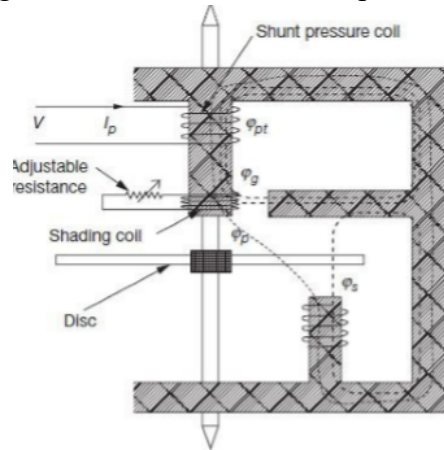
Konsep muatan listrik adalah prinsip dasar untuk menjelaskan fenomena listrik. Besaran yang paling dasar pada rangkaian listrik adalah muatan listrik (*electric charge*). Kita tentunya punya pengalaman melihat pengaruh muatan listrik saat kita memakai atau melepas baju kita yang berbahan wool dan mendapatkannya menempel pada tubuh kita sehingga kita merasakan rambut kita berdiri akibat hal tersebut. Muatan listrik merupakan sifat kelistrikan suatu partikel atom tertentu, satuannya adalah coulombs (C). Muatan listrik dapat diartikan sebagai muatan dasar yang dimiliki suatu benda, yang membuatnya

Gambar 7.9 Diagram fasor yang menunjukkan operasi koil peneduh untuk penyesuaian

### 2. Pita Peneduh Tembaga

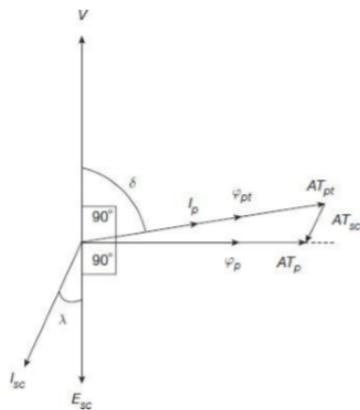
Hasil serupa dari penyesuaian dapat diperoleh dengan menggunakan pita shading tembaga yang ditempatkan pada tungkai pusat magnet shunt. Pengaturan seperti itu ditunjukkan pada Gambar 7.10. Mengikuti argumen yang sama, fluks yang dihasilkan  $\varphi_p$  yang menyeberang ke cakram dapat dibuat untuk tertinggal tegangan suplai  $V$  dengan sudut tepat  $90^\circ$  dengan penyesuaian GGL (Gaya Gerak Listrik) yang tepat yang dihasilkan oleh pita pelindung tembaga. Penyesuaian dalam hal ini dapat dilakukan dengan menggerakkan pita shading di sepanjang sumbu tungkai. Ketika pita-pita bergerak ke atas sepanjang anggota badan, mereka menangkap banyak fluks. Ini menghasilkan peningkatan nilai GGL induksi, peningkatan nilai arus eddy (*Eddy-Current*) terinduksi dan karenanya meningkatkan nilai GGL yang dihasilkan pita. Demikian pula, ketika pita dipindahkan ke bawah, GGL yang diproduksi oleh pita dikurangi. Ini mengubah perbedaan sudut fase antara  $\varphi_p$  dan  $\varphi_{pt}$ , seperti yang dapat diamati pada diagram fasor pada Gambar 7.9. Dengan demikian, penyesuaian yang hati-hati dari posisi pita pelindung tembaga dapat membuat perbedaan fasa

dalam fase dengan  $AT_p$ . Seperti yang terlihat dalam diagram fasor pada Gambar 7.9, fluks  $\varphi_p$  dapat dibuat untuk melewati tegangan suplai  $V$  dengan tepat  $90^\circ$  jika  $AT_p$  atau dengan kata lain, sudut fase koil peneduh  $\lambda$  dapat disesuaikan dengan benar. Sudut fase koil peneduh dapat dengan mudah



disesuaikan dengan memvariasikan resistansi eksternal yang terhubung ke koil peneduh.

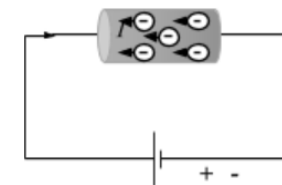
Gambar 7.8 Koil peneduh untuk penyesuaian  $V$  yang tertinggal



mengalami gaya pada benda lain yang berdekatan dan juga memiliki muatan listrik.

Pada ilmu fisika dasar kita mengetahui bahwa seluruh benda tersusun dari atom yang terdiri dari proton, elektron dan neutron. Muatan  $e$  pada elektron adalah negatif dan nilainya sama dengan  $1,602 \times 10^{-19}$  C, ketika proton membawa muatan positif pada nilai yang sama. Adanya nilai proton dan elektron yang sama membentuk atom bermuatan netral. Beberapa hal yang perlu diperhatikan tentang muatan listrik adalah:

1. *Coloumb* adalah satuan dari muatan listrik. Pada muatan 1 C terdapat  $1/(1,602 \times 10^{-19}) = 6,24 \times 10^{18}$  elektron. Nilai muatan yang biasa digunakan pada skala laboratorium adalah pada orde pC, nC dan  $\mu$ C.
2. Sesuai dengan hasil pengamatan, hanya muatan yang terdapat di alam yang merupakan perkalian integral dari muatan listrik  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C.
3. Hukum Kekekalan Muatan menyatakan bahwa muatan tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan, hanya dapat dipindahkan. Dengan demikian jumlah aljabar muatan listrik dalam suatu sistem tidak berubah.



Gambar 1.2. Arus listrik akibat aliran muatan listrik dalam konduktor

Dari Gambar 1.2 kita dapat melihat bahwa muatan listrik dapat mengalir. Muatan dapat berpindah dari satu tempat ke tempat yang lain, dimana muatan dapat diubah menjadi bentuk energi yang lain. Ketika kabel sebagai konduktor (mengandung atom) dihubungkan dengan baterai sebagai sumber *Electromotive Force* (emf) atau gaya gerak listrik (ggl), muatan dipaksa untuk bergerak. Muatan positif bergerak ke satu arah ketika muatan negatif bergerak ke arah berlawanan. Gerakan ini menimbulkan arus listrik. Kita dapat mengartikan arus listrik sebagai perpindahan/pergerakan muatan positif. Pernyataan itu merupakan kebalikan dari Gambar 1.2 yang menunjukkan perpindahan muatan negatif pada suatu konduktor. Pernyataan ini dikemukakan oleh Benjamin Franklin (1706-1790), yang merupakan seorang peneliti dan penemu. Meskipun kita tahu bahwa arus dalam konduktor berbahan metalik terjadi karena elektron bermuatan negatif, namun kita perlu mengikuti kesepakatan bersama bahwa **arus merupakan aliran muatan positif**. Arus listrik dapat diartikan sebagai perubahan muatan setiap satuan waktu, yang diukur dalam ampere (A). Persamaan matematika yang menunjukkan hubungan antara arus ( $i$ ), muatan ( $q$ ) dan waktu ( $t$ ) dapat dilihat pada persamaan 1.2.

$$i \triangleq \frac{dq}{dt} \quad (1.2)$$

Muatan yang mengalir dari  $t_0$  ke  $t$  didapat dengan mengintegrasikan kedua sisi persamaan 1.2, sehingga mendapatkan persamaan 1.3.

menghubungkan disk, dengan demikian menghasilkan torsi penggerak. Dengan penyesuaian yang tepat dari resistansi kumparan naungan, fluks yang dihasilkan dapat dibuat untuk melewati tegangan pasokan tepat dengan sudut  $90^\circ$ .

Pengoperasian koil peneduh dapat dijelaskan dengan bantuan diagram fasor yang ditunjukkan pada Gambar 7.9. Kumparan tekanan, tegangan suplai  $V$ , membawa  $I_p$  saat ini dan menghasilkan  $AT_{pt}$  yang pada gilirannya menghasilkan fluks total  $\varphi_{pt}$ . Fluks  $\varphi_{pt}$  tertinggal tegangan suplai  $V$  oleh sudut  $\varphi$  yang sedikit kurang dari  $90^\circ$ .  $I_p$  saat ini menghasilkan fluks  $\varphi_{pt}$  yang berada dalam fase yang sama dengan  $I_p$ . Fluks  $\varphi_{pt}$  dibagi menjadi dua bagian,  $\varphi$  dan  $\varphi_p$ . Bagian fluks  $\varphi$  melewati celah samping seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.8, dan bagian fluks yang tersisa, yaitu,  $\varphi_p$  melewati disk dan juga koil shading. Karena keterkaitan dengan fluks yang bervariasi waktu, sebuah GGL  $E_{sc}$  diinduksi dalam koil peneduh yang tertinggal di belakang fluks asalnya  $\varphi_p$  sebesar  $90^\circ$  (misal  $E_{sc}$  adalah  $180^\circ$ ) tertinggal di belakang tegangan suplai  $V$ . GGL ini bersirkulasi dan arus eddy  $I_{sc}$  melalui koil shading itu sendiri.  $I_{sc}$  tertinggal di belakang GGL  $E_{sc}$  dengan sudut  $\lambda$  yang tergantung pada impedansi koil shading. Kumparan arus  $I_{sc}$  menghasilkan  $AT_{sc}$  yang dalam fase dengan  $I_{sc}$ . Fluks  $\varphi_p$  yang melewati disk (cakram) akan sefase dengan  $AT_p$  yang dihasilkan yang merupakan penjumlahan dari  $AT_{pt}$  asli dan  $AT_{sc}$  karena koil peneduh. Fluks  $\varphi_p$  ini akan berada

$$= K \int (\text{Daya}) \times dt$$

$$= K \times \text{energi}$$

Dengan demikian, jumlah putaran sebanding dengan energi yang dikonsumsi.

## 7.3 Kesalahan Dalam Energi meter Jenis Induksi dan Kompensasi

### 7.3.1 Kesalahan fase-sudut

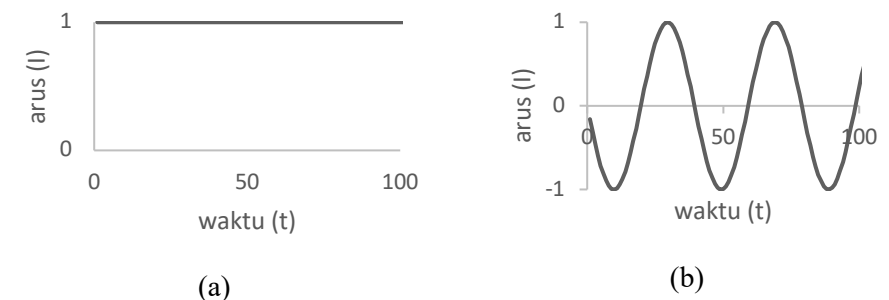
Jelas dari Gambar (7.7) bahwa meter akan menunjukkan energi sejati hanya jika sudut fase antara fluks koil tekanan  $\varphi_p$  dan tegangan suplai  $V$  adalah  $90^\circ$ . Ini mensyaratkan bahwa gulungan kumparan tekanan harus dirancang sebagai sangat induktif. Tetapi, meskipun demikian, sudut fase tidak tepat  $90^\circ$ , melainkan beberapa derajat kurang dari  $90^\circ$ . Penyesuaian yang sesuai dapat diterapkan sedemikian rupa sehingga fluks magnet shunt yang menghubungkan dengan disk dapat dibuat untuk meninggalkan tegangan suplai dengan sudut yang persis sama dengan  $90^\circ$ .

#### 1. Koil Peneduh dengan Resistansi yang Dapat Disesuaikan

Gambar 7.8 menunjukkan pengaturan di mana kumparan tambahan (kumparan naungan) dengan resistansi yang dapat disesuaikan pada tungkai pusat magnet shunt dekat dengan disk. Fluks utama yang dibuat oleh magnet shunt menginduksi GGL (Gaya Gerak Listrik) dalam koil peneduh ini. GGL ini menciptakan fluksnya sendiri. Kedua fluks ini menghasilkan fluks yang dimodifikasi untuk melewati celah udara yang

$$Q \triangleq \int_{t_0}^t i dt \quad (1.3)$$

Terdapat dua macam arus yang kita pelajari, yaitu arus searah (*direct current/dc*) dan arus bolak balik (*alternating current/ac*). Arus searah/dc merupakan arus yang memiliki nilai konstan sepanjang waktu, sedangkan arus bolak balik/ac merupakan arus dengan nilai berubah-ubah secara sinusoidal sepanjang waktu. Perbedaan antara kedua jenis arus tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.3.



Gambar 1.3. Tipe arus: (a) arus searah/dc, (b) arus bolak balik/ac

### 1.3.2. Beda Potensial

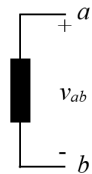
Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan mengenai muatan, khususnya muatan negatif atau elektron. Muatan yang bergerak pada satuan waktu disebut sebagai arus. Untuk menggerakkan elektron dalam sebuah konduktor pada arah tertentu memerlukan usaha atau energi. Usaha ini dilakukan oleh emf (yang dikenal juga sebagai tegangan atau beda potensial) eksternal seperti baterai pada Gambar 1.4. Tegangan atau beda potensial antara dua titik a dan b dalam suatu rangkaian listrik merupakan energi yang diperlukan

untuk menggerakkan muatan dari titik a ke titik b melalui suatu elemen yang secara matematika dapat dituliskan persamaannya:

$$v_{ab} \triangleq \frac{dw}{dq} \quad (1.4)$$

dengan  $w$  adalah energi dalam joule (J),  $q$  adalah muatan dalam coulomb (C) dan  $v_{ab}$  atau  $v$  adalah tegangan dalam volt (V).

Gambar 1.4 menunjukkan bahwa tegangan melewati sebuah elemen yang terhubung dengan titik  $a$  dan  $b$ . Tanda positif (+) dan negatif (-) digunakan untuk menunjukkan polaritas tegangan. Tegangan  $v_{ab}$  dapat diartikan menjadi: (i) titik  $a$  pada potensial  $v_{ab}$  memiliki nilai yang lebih tinggi dari titik  $b$ , atau (ii) potensial titik  $a$  terhadap titik  $b$  adalah  $v_{ab}$ . Sehingga dapat dikatakan bahwa  $v_{ab} = -v_{ba}$ .



Gambar 1.4. Polaritas tegangan  $v_{ab}$

### 1.3.3. Gaya Listrik

Ketika muatan pada benda saling tarik menarik atau saling menjauh, maka di sana terdapat **gaya listrik** yang berlaku antara muatan pada benda tersebut. Hukum Coulomb merupakan hubungan antara muatan pada tubuh,  $q_1$  dan  $q_2$ , dan jarak antara keduanya,  $R$ , dengan gaya,  $F$ , dengan persamaan:

$$F_e = \frac{K q_1 q_2}{R^2} \quad (1.5)$$

Jika  $N$  adalah kecepatan putaran *disk* (cakram), maka torsi pengereman

$$T_d = K_4 N$$

Pada kondisi cakram yang stabil, torsi penggerak harus sama dengan torsi rem,

Jadi

$$K_4 N = K_3 VI \sin(\delta - \theta)$$

atau,

$$N = KVI \sin(\delta - \theta) \quad (7.5)$$

Jika kita dapat membuat  $\delta = 90^\circ$

Maka kecepatan *disk* adalah

$$N = KVI \sin(90^\circ - \theta) = KVI \cos \theta \quad (7.6)$$

Maka kecepatan  $N = K \times Daya$

Jadi, agar kecepatan rotasi dapat dibuat sebanding dengan daya yang dikonsumsi, perbedaan sudut  $\delta$  antara tegangan suplai  $V$  dan fluks koil tekanan  $\varphi_p$  harus dibuat  $90^\circ$

Jumlah total putaran dalam interval waktu  $dt$  adalah

$$\begin{aligned} &= \int N dt = \int KVI \sin(\delta - \theta) dt \\ &= K \int VI \cos \theta dt \bar{Z}_2 \end{aligned} \quad (7.7)$$

Jika,  $\varepsilon = 90^\circ$ , jumlah total putaran



menginduksi dan *eddy* GGL  $E_{es}$  dalam disk, yang pada gilirannya menghasilkan *Eddy current*  $I_{es}$ . *Eddy current*  $I_{es}$  tertinggal di belakang *eddy* GGL  $E_{es}$  dengan sudut yang sama  $\beta$ .

Sekarang, arus eddy  $I_{es}$  berinteraksi dengan fluks  $\varphi_p$  untuk menghasilkan torsi dan arus eddy  $I_{ep}$  berinteraksi dengan fluks  $\varphi_s$  untuk menghasilkan torsi lain. Kedua torsi ini berlawanan arah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.1, dan torsi yang dihasilkan adalah perbedaan dari keduanya.

Berdasarkan persamaan (7.1), torsi yang dihasilkan membelok pada cakram karena aksi gabungan dari dua fluks  $\varphi_p$  dan  $\varphi_s$  diberikan sebagai

$$T_d \propto \frac{\varphi_p \varphi_s \omega}{Z} \cdot \sin \alpha \cos \beta \quad (7.2)$$

di mana,  $Z$  adalah impedansi piringan aluminium dan  $\omega$  adalah frekuensi sudut tegangan suplai.

Torsi penggerak dapat ditulis ulang mengikuti diagram fasor pada Gambar 7.7 sebagai

$$T_d = K_1 \frac{\varphi_p \varphi_s \omega}{Z} \cdot \sin(\delta - \theta) \cos \beta, \text{ dimana } K_1 \text{ adalah konstanta}$$

Karena kita punya,  $j_p \propto V$  dan  $\varphi_s \propto I$ ,

Jadi, torsi

$$T_d = K_2 VI \frac{\omega}{Z} \cdot \sin(\delta - \theta) \cos \beta \quad (7.3)$$

Jika  $\omega, Z$  dan  $\beta$  adalah konstanta, maka

$$T_d = K_3 VI \sin(\delta - \theta) \quad (7.4)$$

dengan  $K = 1/(4\pi\epsilon_0)$ , dengan permitivitas ruang hampa  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ . Satuan gaya listrik adalah newton (N).

### 1.3.4. Medan Listrik

Medan listrik,  $E$ , didefinisikan sebagai gaya listrik yang bekerja pada muatan positif dibagi dengan nilai muatan. Oleh karena itu, medan listrik memiliki satuan dalam SI sebagai newton per coulomb. Secara matematis, persamaan medan listrik adalah:

$$E = \frac{F_e}{q} \quad (1.6)$$

Maka usaha yang dibutuhkan untuk memindahkan muatan sebesar 1 C dalam medan listrik sebesar 1 N/C pada jarak 1 m adalah 1 N.m atau 1 J.

### 1.3.5. Resistansi dan Resistivitas

Ketika tegangan diberikan melewati suatu konduktor, sejumlah arus akan melewati konduktor tersebut sebanding dengan tegangan yang diberikan. Konstanta proporsional adalah **resistansi listrik**,  $R$ , dengan satuan SI ohm ( $\Omega$ ). Resistansi listrik dapat dihubungkan dengan **resistivitas listrik**,  $\rho$ , untuk kabel yang memiliki luas penampang  $A$  dan panjang  $L$  yang dirumuskan dengan persamaan:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1.7)$$

dengan satuan SI  $\Omega.m$ . Suatu konduktor memiliki nilai resistivitas rendah (contoh perak/Ag:  $1,5 \times 10^{-8} \Omega.m$ ), isolator memiliki nilai

resistivitas tinggi (contoh kuarsa:  $5 \times 10^7 \Omega.m$ ) dan semikonduktor memiliki nilai diantara keduanya (contoh silikon/Si:  $2 \Omega.m$ ).

Resistivitas adalah sifat suatu benda dan berhubungan dengan suhu benda dengan persamaan:

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

dengan  $\rho_0$  adalah resistivitas referensi pada suhu referensi  $T_0$  dan  $\alpha$ , koefisien suhu pemuaian benda. Untuk konduktor, nilai  $\alpha$  berkisar antara  $0,0002/^\circ C$  sampai  $0,007/^\circ C$ . Maka untuk suatu kabel persamaannya:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1.8)$$

### 1.3.6. Kapasitansi dan Induktansi

Ketika tegangan melewati dua plat yang dipisahkan oleh celah isolator, muatan akan dijumlahkan pada masing-masing plat. Salah satu plat bermuatan positif (+q) sedangkan plat yang lain bermuatan negatif (-q). Jumlah muatan yang diperoleh secara linear sebanding dengan tegangan yang diberikan. Konstanta proporsional adalah kapasitansi,  $C$ . Maka,  $q=CV$  dengan satuan SI coulomb per volt (C/V) atau farad (F), sebagai penghargaan kepada Michael Faraday (1791-1867).

Induktansi merupakan sifat rangkaian elektronika yang mengakibatkan munculnya potensial listrik yang sebanding dengan arus yang mengalir pada rangkaian. Pengertian tersebut merupakan pengertian dari induktansi sendiri (*self-inductance*). Jika potensial listrik yang dihasilkan merupakan perubahan arus dari rangkaian

$V$  = tegangan suplai

$I$  = arus beban

$\theta$  = sudut fase beban

$\beta$  = sudut fase cakram aluminium

$\alpha$  = sudut fase antara magnet shunt dan fluks magnet seri

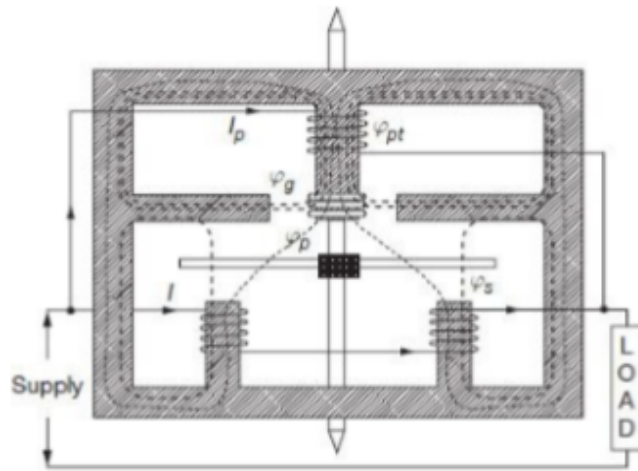
$\delta$  = sudut fase antara tegangan suplai dan fluks koil tekanan

Arus  $I_p$  menghasilkan fluks  $\varphi_{pt}$  yang berada dalam fase yang sama dengan  $I_p$ . Fluks ini dibuat untuk membagi dirinya menjadi dua bagian,  $\varphi_g$  dan  $\varphi_p$ . Bagian utama dari fluks koil tekanan total, yaitu,  $\varphi_g$  melewati celah samping seperti ditunjukkan pada Gambar 7.6, karena jalur ini rendah akibat celah udara yang sangat kecil. Bagian fluks yang tersisa adalah  $\varphi_p$  melewati disk dan menghasilkan torsi penggerak. Karena keengganan jalur yang lebih besar, fluks  $\varphi_p$  ini relatif lebih lemah.

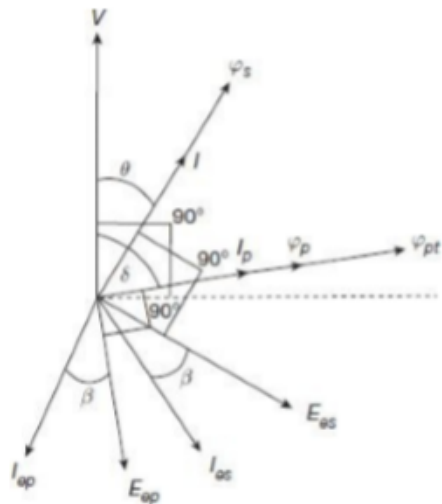
Fluks  $\varphi_p$  sebanding dengan arus  $I_p$  dan dalam fase yang sama, seperti yang ditunjukkan dalam diagram fasor pada Gambar 7.7. Fluks  $\varphi_p$  proporsional dengan tegangan suplai  $V$  dan tertinggal dengan sudut  $\delta$  yang hanya beberapa derajat kurang dari  $90^\circ$ . Fluks  $\varphi_p$  berselang-seling, menginduksi dan eddy GGL (Gaya Gerak Listrik)  $E_{ep}$  dalam disk, yang pada gilirannya menghasilkan arus eddy  $I$ . Tergantung pada sudut impedansi  $\beta$  dari disk aluminium, arus eddy akan tertinggal di belakang eddy GGL  $E_{ep}$  oleh sudut  $\beta$ .

Arus beban  $I$  mengalir melalui kumparan arus magnet seri dan menghasilkan fluks. Fluks ini sebanding dengan arus beban  $I$  dan sedang dalam fase dengannya. Fluks ini, dengan cara yang sama,

Gambar 7.6 menunjukkan jalur fluks yang berbeda saat meteran sedang beroperasi. Diagram fasor yang sesuai ditunjukkan pada Gambar 7.7.



Gambar 7.6 Jalur fluks dalam energi meter fase tunggal tipe-induksi



Gambar 7.7 Diagram fasor meteran energi tipe-induksi satu fasa

Diketahui,

lain/ di luar rangkaian tersebut, maka disebut sebagai induktansi bersama (*mutual inductance*).

## KESIMPULAN

1. Pengukuran merupakan sebuah kegiatan, atau hasil, perbandingan kuantitatif antara besaran yang diberikan dengan besaran lain sejenis yang disebut sebagai satuan.
2. Muatan listrik merupakan sifat kelistrikan suatu partikel atom tertentu, satuannya adalah coulombs (C). Arus merupakan aliran muatan positif yang bergerak setiap satuan waktu.
3. Tegangan atau beda potensial antara dua titik *a* dan *b* dalam suatu rangkaian listrik merupakan energi yang diperlukan untuk menggerakkan muatan dari titik *a* ke titik *b* melalui suatu elemen.
4. Medan listrik, *E*, didefinisikan sebagai gaya listrik yang bekerja pada muatan positif dibagi dengan nilai muatan.

## LATIHAN SOAL

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan besaran, pengukuran, dan alat ukur?
2. Dalam pengukuran terdapat istilah-istilah berikut ini, jelaskan persyaratannya:
  - (i) Akurasi
  - (ii) Presisi
  - (iii) Sensitivitas
3. Apa pentingnya satuan dalam pengukuran? Sebutkan beberapa jenis satuan internasional?

4. Pengaturan DC Generator atau Power Supply agar menghasilkan Output Tegangan 10V, lalu atur Nilai Potensiometer ke 10 Ohm. Berapakah nilai Arus Listrik ?
5. Dua muatan disusun dengan jarak keduanya 5 cm. Muatan di A adalah +10 mikro Coulomb dan muatan di B adalah -5 mikro Coulomb. Besar gaya listrik yang bekerja pada kedua muatan adalah... ( $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , 1 mikro Coulomb =  $10^{-6} \text{ C}$ )

jumlah revolusi seperti yang ditunjukkan oleh cepat dengan meteran konstan. Foto dari sistem registrasi jenis dial ditunjukkan pada Gambar 7.5.



Gambar 7.5 Foto energi meter fase tunggal jenis panggil

### 7.2.3 Pengoperasian Energi meter Tipe Induksi

Sesuai konstruksi, kumparan tekanan dibuat sangat induktif dengan menyediakan banyak belokan. Kesenjangan udara dalam sirkuit magnet shunt juga dibuat kecil untuk mengurangi keberatan jalur fluks shunt. Jadi, ketika tegangan suplai diterapkan pada koil tekanan,  $I_p$  saat ini melalui koil tekanan sebanding dengan tegangan suplai dan tertinggal di belakangnya dengan sudut yang hanya beberapa derajat kurang dari  $90^\circ$ . Idealnya, sudut kelambatan ini seharusnya  $90^\circ$  tetapi untuk hambatan kecil yang tak terhindarkan ada dalam belitan itu sendiri dan kerugian besi terkait dalam rangkaian magnetik.

## BAB II TEORI PENGUKURAN

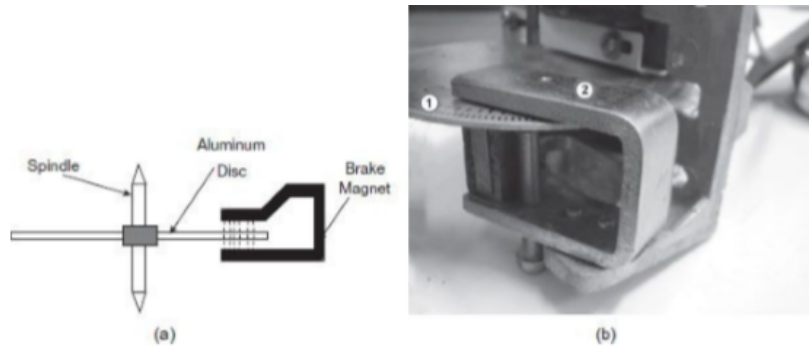
### 2.1. PENDAHULUAN

Dalam kehidupan sehari-hari kita menemukan permasalahan dalam menyatakan panjang, berat maupun volume suatu benda. Permasalahan tersebut secara mudah dapat dijawab oleh panca indera kita dengan menentukan ukuran beberapa tersebut. Besaran merupakan segala sesuatu yang dapat diukur atau dihitung, dinyatakan dengan angka dan mempunyai satuan. Dari pengertian tersebut dapat diartikan bahwa sesuatu itu dapat dikatakan sebagai besaran harus mempunyai 3 syarat yaitu:

1. Dapat diukur atau dihitung.
2. Dapat dinyatakan dengan angka-angka atau mempunyai nilai.
3. Mempunyai satuan.

Jika ada satu saja dari syarat tersebut diatas tidak dipenuhi maka sesuatu itu tidak dapat dikatakan sebagai besaran. Satuan didefinisikan sebagai pembanding dalam suatu pengukuran besaran. Setiap besaran memiliki satuannya sendiri, sehingga tidak ada dua besaran yang memiliki satuan yang sama.

Pengukuran merupakan usaha menyatakan sifat sesuatu benda/zat ke dalam bentuk angka atau harga yang biasa disebut sebagai hasil pengukuran. Pengukuran tersebut pada praktiknya dapat dicapai melalui:



Gambar 7.4 Magnet rem untuk menyediakan pengereman arus eddy dalam energi meter fase tunggal jenis induksi: (a) Diagram skematik (b) Gambar aktual (1) Piringan putar aluminium (2) Magnet rem

Posisi magnet permanen sehubungan dengan disc berputar dapat disesuaikan. Oleh karena itu, torsi pengereman dapat disesuaikan dengan menggeser magnet permanen ke posisi radial yang berbeda sehubungan dengan *disk* (cakram).

Penting untuk disebutkan di sini bahwa magnet seri juga bertindak sebagai magnet pengereman, karena ia berlawanan dengan fluks penghasil torsi utama yang dihasilkan oleh magnet shunt.

#### 4. Sistem Pendaftaran

Fungsi dari sistem pendaftaran atau penghitungan adalah untuk terus-menerus mencatat nilai numerik yang sebanding dengan jumlah putaran yang dibuat oleh sistem rotasi. Dengan kombinasi yang sesuai dari kereta gigi reduksi, rotasi cakram aluminium utama dapat ditransmisikan ke pointer yang berbeda untuk mendaftarkan pembacaan meter pada berbagai dial. Akhirnya, bacaan kWh dapat diperoleh dengan mengalikan

1. Membandingkan dengan alat tertentu yang dianggap sebagai standar.
2. Membandingkan besaran yang akan diukur dengan suatu skala yang telah ditera atau dikalibrasi.

Pengukuran listrik dilakukan untuk mengetahui, menilai dan atau menguji besaran listrik. Hasil pengukuran pada umumnya merupakan penunjukan yang dapat dibaca langsung sebagai hasil pengukuran. Namun demikian terdapat beberapa hasil pengukuran yang tidak dapat menunjukkan nilai pengukuran yang seharusnya sehingga memerlukan perhitungan terlebih dahulu.

Pada dasarnya metode pengukuran dapat dibedakan menjadi metode perbandingan langsung dan metode perbandingan tidak langsung. Pada metode pengukuran langsung, besaran yang tidak diketahui diukur secara langsung. Metode pengukuran langsung dibedakan menjadi metode defleksi dan metode perbandingan. Pada metode defleksi, suatu besaran diukur dengan bantuan alat ukur yang skalanya terkalibrasi yang menunjukkan besaran yang diukur secara langsung, seperti pengukuran arus menggunakan ammeter. Sedangkan pada metode perbandingan, nilai besaran yang diukur ditentukan oleh perbandingan langsung dengan standar besaran yang diberikan, seperti mengukur nilai emf dengan membandingkan emf dengan sel emf standar. Metode perbandingan dapat dikelompokkan menjadi metode null, metode diferensial, dan lainnya. Pada pengukuran dengan metode null, dilakukan pengurangan nilai besaran yang diukur menjadi nol oleh lawan dari besaran yang diketahui dari jenis yang sama. Sebagai

Poros ditunjang oleh poros baja yang didukung oleh bantalan permata di kedua ujungnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.3. Desain unik untuk penskorsan *disk* (cakram) yang berputar digunakan dalam energi meter 'poros mengambang'. Dalam konstruksi semacam itu, poros yang berputar memiliki satu bagian kecil magnet permanen di setiap ujungnya. Magnet atas tertarik oleh magnet yang diletakkan di bantalan atas, sedangkan magnet bawah tertarik oleh magnet lain yang ditempatkan di bantalan bawah. Sistem yang bergerak mengapung tanpa menyentuh salah satu permukaan bantalan. Dengan cara ini, gesekan saat gerakan disk berkurang secara drastis.

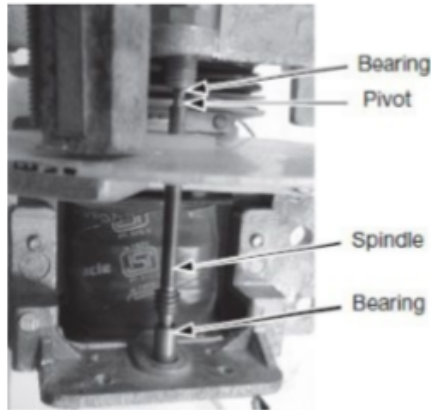
### 3. Sistem pengereman

Sistem pengereman terdiri dari perangkat pengereman yang biasanya merupakan magnet permanen yang diposisikan dekat tepi cakram aluminium. Susunannya ditunjukkan pada Gambar 7.4.

GGL (gaya gerak listrik) yang diinduksikan pada cakram aluminium karena adanya gerakan relatif antara cakram berputar dan magnet permanen tetap (magnet rem) menginduksi arus eddy (*Eddy-Current*) pada cakram. Arus eddy ini, saat berinteraksi dengan fluks magnet rem, menghasilkan torsi perlambatan atau pengereman. Torsi pengereman ini sebanding dengan kecepatan *disc* (cakram) yang berputar. Ketika torsi rem sama dengan torsi operasi, disk berputar dengan kecepatan stabil.

tekanan, dengan demikian, membawa arus yang sebanding dengan tegangan suplai.

Pita shading yang terbuat dari tembaga disediakan pada bagian tengah magnet shunt. Pita shading, seperti yang akan dijelaskan nanti, digunakan untuk membawa fluks  $i$  - Bantalan yang dihasilkan oleh magnet shunt persis di quadrature Pivot dengan tegangan yang diberikan.



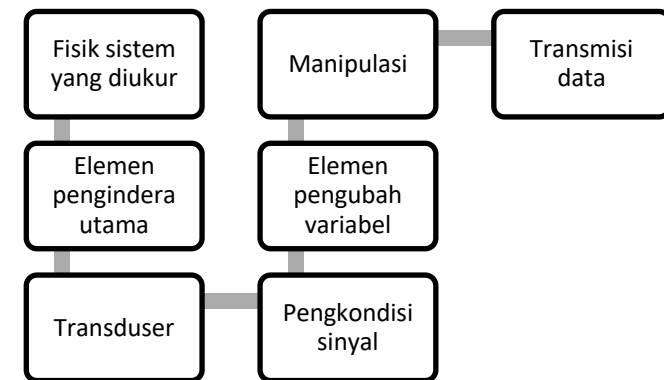
Gambar 7.3 Pivot dan bantalan permata

## 2. Sistem Pindah

Sistem yang bergerak terdiri dari piringan aluminium ringan yang dipasang pada poros. *Disk* (cakram) ditempatkan di ruang antara seri dan magnet shunt. Disk ditempatkan sedemikian rupa sehingga memotong fluks yang dihasilkan oleh kedua magnet. Torsi yang membelokkan pada *disk* (cakram) dihasilkan oleh interaksi antara fluks-fluks ini dan arus eddy (*Eddy-Current*) yang ditimbulkannya dalam *disk* (cakram). Dalam energi meter, tidak ada pegas kontrol seperti itu, sehingga ada rotasi *disk* (cakram) yang berkelanjutan.

contoh pengukuran berat dengan prinsip keseimbangan serta pengukuran resistansi, kapasitansi dan induktansi dengan rangkaian jembatan.

Pada metode pengukuran tidak langsung, perbandingan dilakukan sesuai standar melalui penggunaan sistem yang terkalibrasi. Metode pengukuran ini digunakan pada kasus parameter yang diinginkan untuk diukur sulit untuk diukur secara langsung, namun parameter tersebut memiliki hubungan dengan beberapa parameter terkait lainnya yang dapat diukur dengan mudah. Sebagai contoh, eliminasi bakteri dalam suatu cairan berhubungan secara langsung dengan suhu cairan. Oleh karena itu, eliminasi bakteri dapat diukur secara tidak langsung dengan melakukan pengukuran suhu cairan. Metode pengukuran tidak langsung merupakan praktik umum untuk membangun hubungan empiris antara besaran yang diukur secara aktual dan parameter yang diinginkan.



Gambar 2.1. Sistem pengukuran secara umum

Sistem pengukuran dapat didefinisikan sebagai pengaturan sistematis untuk pengukuran atau penentuan besaran yang tidak

diketahui dan analisis suatu peralatan. Pengukuran suatu besaran dapat dijelaskan melalui sebuah sistem pengukuran secara umum pada Gambar 2.1.

## 2.2. ALAT UKUR

Besaran listrik seperti arus, tegangan, daya dan sebagainya tidak dapat diukur dengan panca indera manusia secara langsung. Agar besaran listrik dapat dibaca oleh indera manusia maka perlu mentransformasikan ke dalam besaran mekanis atau besaran lainnya. Sebagai contoh transformasinya adalah perubahan arus menjadi suatu komponen yang bergerak rotasi yang bergerak pada sumbunya (penunjukkan jarum yang bergerak dari kiri ke kanan). Besar sudut rotasi berhubungan langsung dengan besaran arus listrik yang diukur, sehingga besar sudut yang dihasilkan dapat dianggap setara dengan nilai arus yang diukur pada rangkaian.

Alat yang digunakan sebagai pembanding atau penunjuk disebut instrumen pengukur. Instrumen ini berfungsi sebagai nilai besaran listrik yang diukur oleh alat tersebut. Peralatan yang digunakan dalam sistem pengukuran listrik yang mentransformasikan besaran listrik disebut alat ukur listrik. Pada umumnya alat ukur dibagi menjadi *absolute instrument* dan *secondary instrument*. *Absolute instrument* digunakan sebagai acuan dasar pengukuran dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi dan biasanya digunakan pada laboratorium sebagai alat ukur standar. Sedangkan *secondary instrument* dapat digunakan untuk mengukur besaran listrik jika sudah dikalibrasi terlebih dahulu

Gambar 7.2 (a) Detail konstruksi meteran energi satu fasa jenis induksi (b) Foto meteran energi satu fasa jenis induksi (Sumber: Creative Commons Attribution Share Alike 2.5)

1. Kumparan Volatage - banyak lilitan kawat halus yang terbungkus plastik, dihubungkan secara paralel dengan beban.
2. Kumparan Current - beberapa putaran kawat tebal, dihubungkan secara seri dengan beban
3. Stator - mengonsentrasikan dan membatasi medan magnet.
4. Cakram Aluminium rotor.
5. Magnet rem rotor
6. Spindle dengan gigi cacing.
7. Tampilan panggilan

Pengukur energi satu fase memiliki empat bagian penting:

- (i) Sistem operasi
- (ii) Sistem pemindahan
- (iii) Sistem pengereman
- (iv) Sistem pendaftaran

### 1. Sistem operasi

Sistem operasi terdiri dari dua buah elektromagnet. Inti dari elektromagnet ini terbuat dari laminasi baja silikon. Kumparan salah satu elektromagnet ini (magnet seri) dihubungkan secara seri dengan beban, dan disebut kumparan arus. Elektromagnet lain (magnet shunt) dililit dengan kumparan yang terhubung melintasi suplai, disebut kumparan tekanan. Kumparan

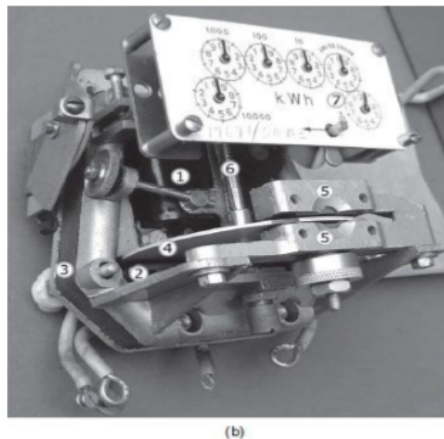
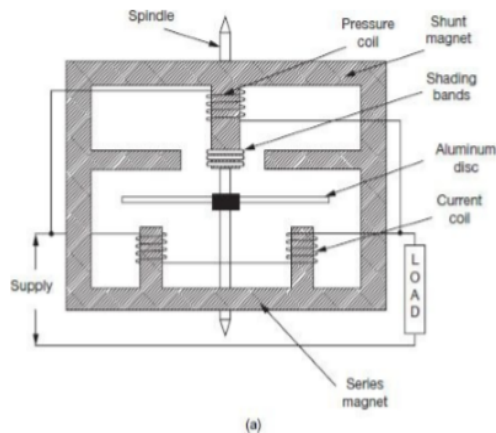


(cakram) harus sekuat mungkin, sehingga nilai  $\cos \beta$  setinggi mungkin.

2. Torsi berbanding lurus dengan  $\sin \alpha$ . Oleh karena itu, untuk mendapatkan fungsi defleksi yang besar, sudut  $\alpha$  antara kedua fluks sebaiknya hampir mendekati  $90^\circ$ .

### 7.2.2 Rincian Konstruksional Energi Meter Tipe Induksi

Rincian konstruksi dari meteran energi satu fasa jenis induksi secara skematis ditunjukkan pada Gambar 7.2 (a). Foto aransemennya ditunjukkan pada Gambar 7.2 (b).



dengan membandingkannya dengan *absolute instrument*. Alat ukur sekunder atau *secondary instrument* dapat dibedakan menjadi 3, yaitu:

1. *Indicating instrument* adalah alat ukur langsung menunjukkan nilai besaran langsung. Sebagai contoh voltmeter analog menunjukkan nilai tegangan secara langsung melalui jarum penunjuk.
2. *Recording instrument* adalah alat ukur yang mencatat besaran yang diukur dan perubahannya dalam selang waktu tertentu.
3. *Integrating instrument* adalah alat ukur yang sekaligus mengukur dan mencatat baik besaran listrik maupun jumlah total tenaga listrik yang dicatu pada suatu rangkaian dalam selang waktu tertentu.

Dalam pengukuran terdapat beberapa istilah yang sering digunakan, antara lain instrumen, ketelitian (*accuracy*), ketepatan (*precision*), sensitivitas (*sensitivity*), resolusi (*resolution*) dan kesalahan (*error*).

1. Instrumen: sebuah alat untuk menentukan nilai atau besaran suatu kuantitas atau variabel.
2. Ketelitian (*accuracy*): harga terdekat pembacaan instrumen yang mendekati harga atau nilai sebenarnya dari variabel yang diukur.
3. Ketepatan (*precision*): suatu ukuran kemampuan untuk mendapatkan hasil yang serupa dari beberapa kali pengukuran.

4. Sensitivitas (*sensitivity*): perbandingan antara sinyal keluaran atau respon instrumen terhadap perubahan masukan atau variabel yang diukur.
5. Resolusi (*resolution*): perubahan terkecil dalam nilai yang diukur terhadap instrumen yang akan memberi respon atau tanggapan.
6. Kesalahan (*error*): penyimpangan variabel yang diukur terhadap nilai sebenarnya.

### 2.2.1. Akurasi dan Presisi

Dalam melakukan pengukuran kita tidak bisa lepas dari istilah akurasi dan presisi. Akurasi merupakan ukuran seberapa dekat hasil pengukuran yang dilakukan dibandingkan dengan nilai sebenarnya. Semakin dekat nilai hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya maka semakin akurat alat ukur yang digunakan dan hasil pengukurannya. Sedangkan presisi menggambarkan seberapa dekat hasil pengukuran yang dilakukan antara satu pengukuran dengan pengukuran yang lain.

Gambar 2.2 menunjukkan beberapa kondisi yang menjelaskan tingkat akurasi dan presisi dari tembakan yang dilakukan terhadap target. Gambar 2.2 (a) menunjukkan tingkat akurasi dan presisi yang tidak baik. Gambar 2.2 (b) menunjukkan tingkat akurasi yang tidak baik namun memiliki tingkat presisi yang tinggi. Tembakan yang dilakukan hampir mendekati satu sama lain. Berbeda dengan Gambar 2.2 (c) yang menunjukkan nilai tembakan yang mendekati sasaran, namun demikian tingkat presisinya masih kurang baik.

Torsi sesaat  $T_{d1}$  dihasilkan karena interaksi arus  $i_1$  dan fluks  $\varphi_2$  diberikan oleh

$$T_{d1} \propto \varphi_2 i_1$$

Demikian pula, torsi instan  $T_{d2}$  dihasilkan karena interaksi arus  $i_2$  dan fluks  $\varphi_1$  diberikan oleh

$$T_{d2} \propto \varphi_1 i_2$$

Torsi pembelokan total dapat dihitung sebagai

$$T_d \propto T_{d1} - T_{d2} \propto \varphi_2 i_1 - \varphi_1 i_2$$

$$T_d \propto \left[ \varphi_{2m} \sin(\omega t - \alpha) \right] \times \left\{ -\frac{\varphi_{1m} \omega \cos(\omega t - \beta)}{Z} \right\}$$

$$- \left[ \varphi_{1m} \sin \omega t \right] \times \left\{ -\frac{\varphi_{2m} \omega \cos(\omega t - \alpha - \beta)}{Z} \right\}$$

$$T_d \propto \frac{\varphi_{1m} \varphi_{2m} \omega}{Z} [\sin \omega t \cos(\omega t - \alpha - \beta) - \sin(\omega t - \alpha) \cos(\omega t - \beta)]$$

$$T_d \propto \frac{\varphi_{1m} \varphi_{2m} \omega}{Z} \cdot \frac{1}{2} \left[ \sin(\omega t + \omega t - \alpha - \beta) + \sin(\omega t - \omega t + \alpha + \beta) \right]$$

$$\left[ -\sin(\omega t - \alpha + \omega t - \beta) - \sin(\omega t - \alpha - \omega t + \beta) \right]$$

$$T_d \propto \frac{\varphi_{1m} \varphi_{2m} \omega}{Z} \cdot \frac{1}{2} \left[ \sin(2\omega t - \alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta) \right]$$

$$\left[ -\sin(2\omega t - \alpha - \beta) - \sin(\beta - \alpha) \right]$$

$$T_d \propto \frac{\varphi_{1m} \varphi_{2m} \omega}{Z} \cdot \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) - \sin(\beta - \alpha)]$$

$$T_d \propto \frac{\varphi_{1m} \varphi_{2m} \omega}{Z} \cdot \frac{1}{2} [\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta - \sin \beta \cos \alpha + \cos \beta \sin \alpha]$$

$$T_d \propto \frac{\varphi_{1m} \varphi_{2m} \omega}{Z} \cdot \sin \alpha \cos \beta \quad (7.1)$$

Dua pengamatan berikut dapat dilakukan dari Persamaan. (7.1):

1. Torsi berbanding lurus dengan faktor daya cakram aluminium ( $\cos \beta$ ). Dengan demikian, untuk meningkatkan torsi defleksi, jalur arus eddy dalam *disk*

$$\varphi_1 = \varphi_1 = \varphi_{1m} \sin \omega t$$

dan

$$\varphi_2 = \varphi_{2m} \sin(\omega t - \alpha)$$

di mana,  $\varphi_{1m}$  dan  $\varphi_{2m}$  masing-masing adalah nilai puncak fluks  $\varphi_1$  dan  $\varphi_2$ .

Fluks  $\varphi_1$  akan menghasilkan GGL bolak-balik pada *disk* (cakram), yang diberikan oleh

$$e_1 = -\frac{d\varphi_1}{dt} = -\frac{d}{dt}(\varphi_{1m} \sin \omega t) = -\varphi_{1m} \omega \cos \omega t$$

Demikian pula, GGL bolak-balik yang dihasilkan dalam *disk* (cakram) karena fluks  $\varphi_2$  diberikan oleh

$$e_2 = -\varphi_{2m} \omega \cos(\omega t - \alpha)$$

Jika,  $\bar{Z}$  dianggap impedansi cakram aluminium dengan faktor daya  $\beta$  maka arus eddy yang diinduksi dalam *disk* (cakram) karena GGL  $e_1$  dapat dinyatakan sebagai

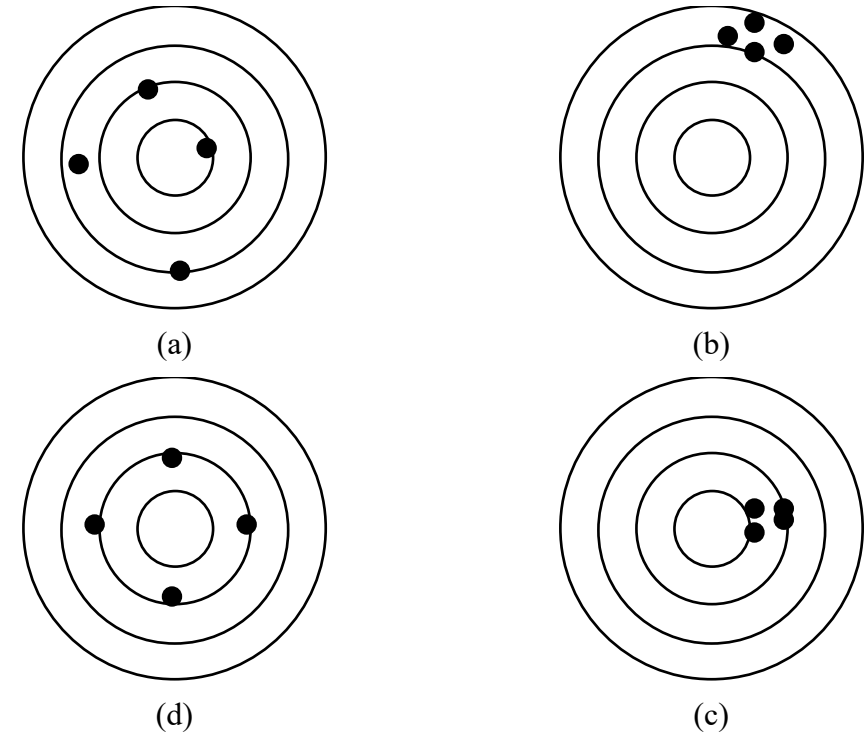
$$i_1 = \frac{e_1}{Z} = \frac{\varphi_{1m} \omega \cos(\omega t - \beta)}{Z}$$

Demikian pula, arus eddy yang diinduksi dalam *disk* (cakram) karena GGL  $e_2$  diberikan oleh

$$i_2 = \frac{e_2}{Z} = \frac{\varphi_{2m} \omega \cos(\omega t - \alpha - \beta)}{Z}$$

Torsi sesaat yang dikembangkan sebanding dengan produk dari arus sesaat dan fluks sesaat adalah yang berinteraksi satu sama lain untuk menghasilkan torsi yang dipertanyakan.

Gambar 2.2 (d) menunjukkan hasil yang terbaik dengan akurasi yang tinggi serta presisi yang baik pula.



Gambar 2.2. Presisi dan akurasi (a) tidak presisi dan tidak akurat; (b) presisi dan tidak akurat, (c) akurat dan tidak presisi, (d) akurat dan presisi

### 2.2.2. Standar Pengukuran dan Standar Listrik

Standar pengukuran merupakan pernyataan disisi dari sebuah satuan pengukuran. Dengan adanya satuan dasar dan satuan turunan dalam pengukuran, terdapat beberapa jenis standar pengukuran yang dikelompokkan menurut fungsi dan pemakaiannya, yaitu Standar Internasional yang merupakan pengukuran yang disepakati melalui perjanjian internasional dan diperiksa melalui pengukuran-pengukuran absolut yang dinyatakan dalam satuan-satuan standar. Standar primer (*primary*

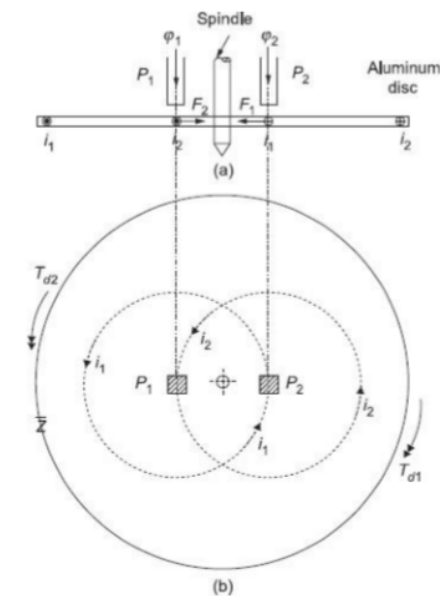
*standard*) merupakan satuan pengukuran yang digunakan oleh laboratorium standar nasional di berbagai negara di dunia. Standar sekunder (*secondary standard*) merupakan acuan dasar bagi standar yang digunakan dalam laboratorium pengukuran industri. Standar kerja (*working standard*) merupakan alat utama bagi sebuah laboratorium pengukuran dan digunakan untuk memeriksa dan mengkalibrasi instrumen-instrumen laboratorium yang umum mengenai ketelitian dan presisi atau untuk melakukan perbandingan dalam pemakaian industri.

Guna mendapatkan hasil pengukuran yang benar dan terpercaya, maka diperlukan alat ukur standar guna mengkalibrasi atau menera alat ukur listrik yang ada. Macam-macam standar besaran listrik antara lain arus standar, tegangan standar, tahanan standar, kapasitansi standar dan induktansi standar. Di samping kecermatan sebagai syarat utama, standar listrik perlu memiliki kestabilan nilai besarnya baik selama kerja berlangsung maupun dalam penyimpanan. Untuk keperluan ini perlu diadakan pengujian secara berkala agar alat ukur dapat digunakan setiap saat.

### 2.3. KESALAHAN DALAM PENGUKURAN

Pengukuran sebagai suatu proses hasilnya sangat tergantung dari beberapa unsur utama, yaitu peralatan yang digunakan untuk pengukuran, orang yang melakukan pengukuran dan cara melaksanakan pengukuran. Jika salah satu dari unsur-unsur tersebut tidak terpenuhi maka hasil pengukuran yang dihasilkan menjadi tidak baik.

karenanya mereka menginduksi GGL dalam disk aluminium. GGL yang diinduksi ini pada gilirannya akan menghasilkan arus eddy  $i_1$  dan  $i_2$  pada disk, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.1. Ada dua set fluks  $\varphi_1$  dan  $\varphi_2$ , dan dua set arus  $i_1$  dan  $i_2$ .  $I_1$  saat ini berinteraksi dengan fluks  $\varphi_2$  untuk menghasilkan gaya  $F_1$  dan karenanya torsi  $T_{d1}$  pada disk. Demikian pula,  $i_2$  saat ini berinteraksi dengan fluks  $\varphi_1$  untuk menghasilkan gaya  $F_2$  dan karenanya torsi  $T_{d2}$  pada disk. Total torsi adalah resultan dari torsi  $T_{d1}$  dan  $T_{d2}$ .



Gambar 7.1 Prinsip kerja instrumen tipe induksi: (a) Tampak depan (b) Tampak atas

Misalkan  $\varphi_1$  dan  $\varphi_2$  adalah nilai sesaat dari dua fluks yang memiliki perbedaan fase  $\alpha$  di antara keduanya. Karena itu, dapat ditulis

dilakukan per kWh, digunakan. Nilai konstanta meter biasanya ditandai pada meter kandang.

## 7.2 Induksi Fase Tunggal Tipe Energi Meter

Instrumen tipe induksi paling sering digunakan sebagai energi meter (wattmeter) untuk pengukuran energi di sirkuit AC (alternative Current) pada lingkup domestik dan industri. Energi meter tipe induksi memiliki gesekan yang lebih rendah dan rasio torsi / berat yang lebih tinggi; mereka tidak mahal, namun cukup akurat dan dapat mempertahankan akurasinya pada rentang beban dan suhu yang cukup besar.

### 7.2.1 Teori Dasar Meter Induksi

Pada semua instrumen tipe induksi, dua fluks dengan variasi waktu dibuat pada belitan yang disediakan pada bagian instrumen statis. Fluks ini dibuat untuk menghubungkan cakram logam atau drum dan menghasilkan GGL (Gaya Gerak Listrik) di dalamnya. GGL pada gilirannya, mengedarkan arus eddy (*Eddy-Current*) pada badan cakram logam. Interaksi antara fluks dan arus eddy ini menghasilkan torsi yang membuat cakram atau drum berputar. Diagram skematik yang mewakili gambaran depan dan atas dari instrumen seperti itu ditunjukkan pada Gambar 7.1.

Cakram aluminium tipis yang bebas berputar di sekitar poros tengahnya dilengkapi dengan spindel dan diletakkan di bawah dua kutub  $\varphi_1$  dan  $\varphi_2$ . Fluks  $\varphi_1$  dan  $\varphi_2$  keluar dari keduanya elektromagnet  $\varphi_1$  dan  $\varphi_2$  terhubung dengan piringan aluminium yang ditempatkan di bawah. Fluks ini berganti-ganti di alam, dan

Pada kenyataannya tidak ada pengukuran yang menghasilkan hasil yang sempurna. Perbedaan antara nilai hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya disebut kesalahan (*error*). Tingkat keberhasilan suatu pengukuran sebenarnya tidak secara langsung ditentukan oleh nilai kesalahan tersebut melainkan yang lebih penting adalah nilai kesalahan relatif, yaitu perbandingan antara nilai kesalahan terhadap nilai yang benar. Kesalahan relatif dapat dituliskan pada persamaan 2.1 dan persentase kesalahannya pada persamaan 2.2.

$$e_r = \frac{\text{nilai kesalahan}}{\text{nilai sebenarnya}} = \frac{\delta A}{A} \quad (2.1)$$

$$\% \text{kesalahan} = e_r \times 100\% \quad (2.2)$$

### 2.3.1. Kesalahan Umum (*Gross Error*)

Kesalahan umum merupakan kesalahan yang terjadi akibat kesalahan manusia dalam menggunakan dan membaca alat ukur, mencatat dan menaksirkan hasil pengukuran. Kecerobohan ini biasa terjadi pada pemula dalam menggunakan alat ukur. Umumnya instrumen penunjuk dapat berubah kondisi sampai batas tertentu setelah digunakan mengukur sebuah rangkaian yang lengkap dan akibatnya besaran yang diukur akan berubah (efek pembebanan). Kesalahan ini dapat dikurangi dengan banyaknya latihan serta meningkatkan ketelitian pembacaan.

### 2.3.2. Kesalahan Sistematis (*Systematic Error*)

Kesalahan sistematis dapat dikategorikan menjadi kesalahan lingkungan dan kesalahan alat ukur. Kesalahan lingkungan

disebabkan oleh keadaan luar yang mempengaruhi alat ukur seperti efek perubahan suhu, kelembaban, tekanan udara luar atau medan magnet, medan listrik. Kesalahan-kesalahan instrumental merupakan kesalahan yang tidak dapat dihindari, dari instrumen karena struktur mekanisnya. Jenis kesalahan instrumental lainnya adalah kesalahan kalibrasi yang mengakibatkan pembacaan instrumen yang terlalu tinggi atau terlalu rendah sepanjang seluruh skala (kegagalan mengembalikan jarum penunjuk ke nol sebelum melakukan pengukuran), memiliki efek serupa.

Cara paling cepat dan mudah untuk memeriksa instrumen tersebut adalah membandingkan dengan instrumen lain yang memiliki karakteristik yang sama atau terhadap suatu alat ukur yang diketahui lebih akurat/ teliti. Kesalahan instrumental dapat dihindari dengan pemilihan instrumen yang tepat untuk pemakaian tertentu, menggunakan faktor-faktor koreksi setelah mengetahui banyaknya jumlah kesalahan instrumental dan mengkalibrasi instrumen tersebut terhadap instrumen standar.

### 2.3.3. Kesalahan Acak (*Random Error*)

Kesalahan ini diakibatkan oleh penyebab yang tidak diketahui dan terjadi walaupun semua kesalahan sistematis telah diperhitungkan. Untuk menghasilkan nilai pengukuran yang baik dengan memperbanyak jumlah pengukuran dan mengubah cara-cara statistik untuk mendapatkan pendekatan paling baik nilai terhadap yang sebenarnya.

## BAB VII PENGUKURAN ENERGI

### 7.1 Pendahuluan

Energi adalah total daya yang dikonsumsi selama interval waktu tertentu, yaitu  $Energi = Daya \times Waktu$ . Secara umum, proses pengukuran energi sama dengan pengukuran daya kecuali kenyataan bahwa instrumen yang digunakan tidak hanya mengukur daya atau tingkat konsumsi energi, tetapi juga harus memperhitungkan interval waktu selama daya dipasok.

Unit energi dapat dinyatakan dalam satuan Joule atau Watt-second atau Watt-hour sesuai kenyamanan. Unit yang lebih besar yang paling sering digunakan adalah kilowatt-jam (kWh), yang didefinisikan sebagai energi yang dikonsumsi ketika daya dikirim pada tingkat rata-rata 1 kilowatt selama satu jam. Dalam pengukuran komersial, jumlah energi 1 kilowatt-jam (kWh) ini ditetapkan sebagai 1 unit energi.

Energi meter (Wattmeter) yang digunakan untuk pengukuran energi memiliki sistem gerak yang berputar terus menerus, tidak seperti dalam menunjukkan instrumen dimana ia membelokkan hanya melalui sebagian kecil dari revolusi (putaran). Dalam energi meter, kecepatan revolusi sebanding dengan daya yang dikonsumsi. Jadi, jumlah total putaran yang dibuat oleh sistem penggerak meter selama interval waktu tertentu sebanding dengan energi yang dikonsumsi. Dalam konteks ini, istilah yang disebut adalah konstanta meter, didefinisikan sebagai jumlah putaran yang

kedua bacaan positif, dan (b) ketika pembacaan wattmeter kedua diperoleh setelah membalikkan koneksi kumparan saat ini!

5. Jelaskan bagaimana faktor daya dari beban tiga fase yang tidak diketahui dapat diperkirakan dengan menggunakan dua watt meter.

## 2.4. ANALISIS STATISTIK

Analisis statistik terhadap data pengukuran merupakan pekerjaan yang biasa dilakukan agar dimungkinkan penentuan ketidakpastian hasil pengujian akhir secara analitis. Oleh karena itu diperlukan tidak hanya sekali pengukuran melainkan banyak pengukuran. Dengan adanya banyak data maka perlu adanya metode analisis untuk mendapatkan nilai hasil pengukuran yang mendekati nilai sebenarnya.

Secara teoritis jumlah pengukuran yang tak terhingga akan menghasilkan nilai pengukur yang paling baik. Namun demikian pada praktiknya jumlah pengukuran adalah terbatas. Nilai paling mungkin dari sejumlah pengukuran yang dilakukan adalah nilai rata-rata yang sesuai dengan persamaan 2.3.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x}{n} \quad (2.3)$$

Dengan:  $\bar{x}$  = harga rata-rata

$x_1, x_2, x_n$  = hasil pengukuran

$n$  = jumlah pengukuran

Deviasi merupakan selisih antara hasil pengukuran terhadap nilai rata-rata. Sebagai contoh jika dilakukan beberapa kali pengukuran dengan nilai penyimpangan pengukuran pertama  $x_1$  dan  $d_1$ , kedua  $x_2$  dan  $d_2$ , maka standar deviasi tertulis pada persamaan 2.4.

$$d_n = x_n - \bar{x} \quad (2.4)$$

Maka nilai penyimpangan kedua pengukuran adalah  $d_1 = x_1 - \bar{x}$  dan  $d_2 = x_2 - \bar{x}$ . Deviasi dapat bernilai positif maupun negatif dan jumlah aljabar semuanya harus nol.

Deviasi rata-rata merupakan tingkatan ketepatan alat ukur. Alat ukur yang ketepatannya tinggi akan menghasilkan deviasi rata-rata rendah. Deviasi rata-rata dinyatakan sesuai persamaan 2.5.

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + |d_3| + \dots + |d_n|}{n} = \frac{\sum |d|}{n} \quad (2.5)$$

Deviasi standar (*standard deviation*) merupakan cara yang digunakan untuk menganalisa kesalahan acar secara statistik. Deviasi standar dari sejumlah pengukuran atau pengamatan yang terbatas jumlahnya dapat dilihat pada persamaan 2.6. namun pada praktiknya jumlah pengamatan adakah terbatas sehingga deviasi standarnya ditulis pada persamaan 2.7.

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum d_t^2}{n}} \quad (2.6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum d_t^2}{n-1}} \quad (2.7)$$

## 2.5. KEMUNGKINAN KESALAHAN

Tabel 2.1 menunjukkan contoh hasil pengukuran tegangan yang dilakukan sebanyak 50 kali dengan interval pembacaan 0,1 V. Nilai nominal tegangan yang diukur adalah 12 V. Hasil pengamatan Tabel 2.1 dapat digambarkan dalam bentuk gambar sesuai Gambar 2.2. Pada Gambar 2.2 tampak bahwa nilai pembacaan yang paling banyak terjadi pada nilai 12,0 V sebagai

## KESIMPULAN

1. Tenaga listrik (P) yang terpakai oleh beban (R) yang dipasok dari catu daya dc (VS) adalah produk dari tegangan yang melintasi beban ( $V_R$ ) dan arus yang mengalir melalui beban.
2. Dalam rangkaian arus bolak-balik, daya sesaat bervariasi secara terus-menerus karena tegangan dan arus bervariasi saat melalui siklus.
3. Wattmeter tipe elektrodinamometer memiliki konstruksi dan desain yang mirip dengan elektrodinamometer analog untuk mengukur arus listrik (ammeter) dan tegangan (voltmeter)

## LATIHAN

1. Jelaskan secara detail konstruksi wattmeter tipe elektrodinamometer!
2. Sebutkan berbagai sumber kesalahan dalam pengukur watt tipe elektrodinamometer!
3. Pengukuran beban pada 100 V dan 9 A pada faktor daya 0,1 lagging. Sirkuit koil tekanan memiliki resistansi 3000  $\Omega$  dan induktansi 30 mH. Hitung persentase kesalahan dalam pembacaan wattmeter ketika koil tekanan terhubung (a) di sisi beban, dan (b) di sisi pasokan. Koil saat ini memiliki ketahanan 0,1  $\Omega$  dan induktansi diabaikan. Asumsikan frekuensi pasokan 50 Hz!
4. Dua wattmeter terhubung untuk mengukur daya yang dikonsumsi oleh beban seimbang 3 fase. Salah satu wattmeter membaca 1500  $\Omega$  dan yang lainnya 700  $\Omega$ . Temukan faktor daya beban, ketika (a)



Fasor  $I_B$  mewakili arus yang mengalir melalui CC dari wattmeter. Tegangannya diterapkan pada koil tegangan adalah sebesar perbedaan tegangan antara garis R dan Y, yaitu perbedaan antara  $V_{RN}$  Fasors dan  $V_{YN}$ , yaitu  $V_{RY}$  Fasor. Fase-sudut antara  $V_{RY}$  dan  $-V_N$  adalah  $30^\circ$ , untuk keseimbangan sistem, dan antara  $-V_{YN}$  dan  $V_{BN}$  adalah  $60^\circ$ . Jadi, perbedaan sudut fase total antara  $V_{RY}$  dan  $V_{BN}$  adalah  $90^\circ$ , dan sudut antara  $V_{RY}$  dan  $I_B$  adalah  $(90^\circ + \phi)$ . Wattmeter akan membaca

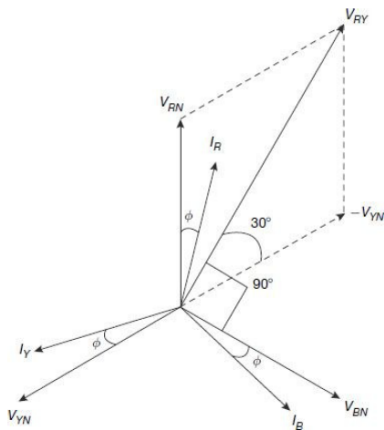
$$V_{RY} \times I_B \times \cos(90^\circ + \phi) = \sqrt{3} VI \cos(90^\circ + \phi)$$

$$= -\sqrt{3} VI \sin \phi = -W_R$$

Dimana V adalah tegangan rms perfase dan I adalah garis sebenarnya dari sistem.

Oleh karena itu, total daya reaktif rangkaian adalah:

$$3 VI \sin \phi = -\sqrt{3} W_R$$



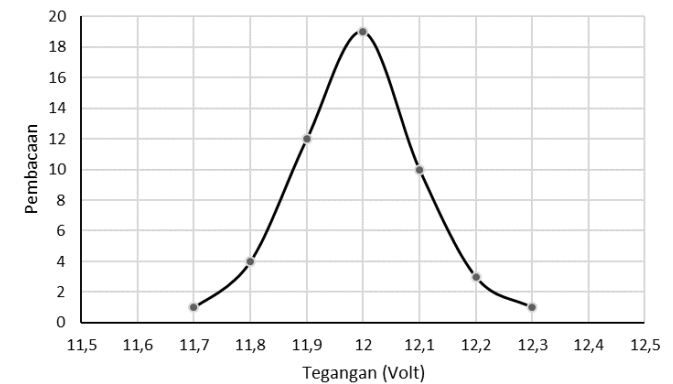
Gambar 6.25. Diagram fasor untuk pengukuran daya reaktif

titik sentral (*central value*) sebanyak 19 kali pembacaan. Nilai pembacaan lain terletak di sisi kanan dan kiri titik sentral secara simetris.

Tabel 2.1. Hasil pembacaan tegangan

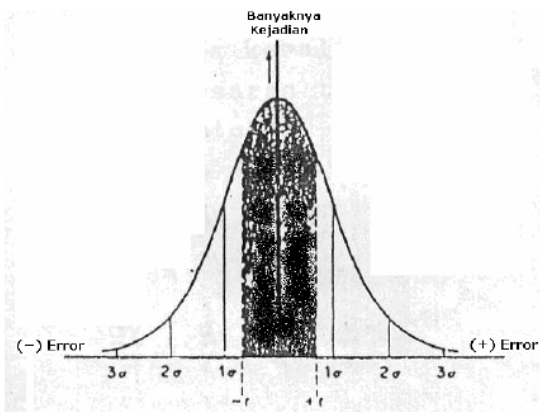
Pembacaan Tegangan (Volt)	Jumlah Pembacaan
11,7	1
11,8	4
11,9	12
12,0	19
12,1	10
12,2	3
12,3	1
Jumlah = 50	

Meskipun jumlah pembacaan ditambah (lebih dari 50) dan interval pembacaan lebih kecil dari 0,1 V, distribusi nilai pembacaan tegangan kemungkinan juga akan simetri di titik sentral sehingga bentuk histogram mendekati sebelumnya. Bentuk kurva yang dihasilkan adalah Kurva Gaussian, yaitu nilai yang sangat mungkin dianggap sebagai nilai sesungguhnya dari hasil pemnukuran adalah nilai sentral.



Gambar 2.2. Grafik pembacaan tegangan

Saat melakukan pengukuran *random errors* yang terjadi dapat bernilai positif dan negatif serta kemungkinan terjadi kesalahan bernilai positif dan negatif adalah sama. Oleh karena itu diharapkan jumlah kesalahan pengukuran berharga positif dan negatif berjumlah sama sehingga kesalahan total akan sangat kecil dan nilai rata-rata hasil pengukuran mendekati nilai sebenarnya (*true value*).



Gambar 2.3. Grafik kurva Gaussian

Daerah di bawah kurva gaussian (Gambar 2.3) antara batas  $+\infty$  dan  $-\infty$  menyatakan jumlah observasi keseluruhan. Daerah kurva antara batas  $+\sigma$  dan  $-\sigma$  menyatakan keadaan pengukuran dengan perbedaan keadaan pengukuran dengan harga rata-rata tidak lebih dari standar deviasi. Jumlahnya kira-kira 68% dari seluruh hasil pengamatan.

Hubungan nilai-nilai deviasi lainnya yang dinyatakan dalam  $\sigma$  tampak pada Tabel 2.2. sebagai contoh sejumlah resistor yang memiliki nilai nominal  $100,00 \Omega$  yang diukur nilainya

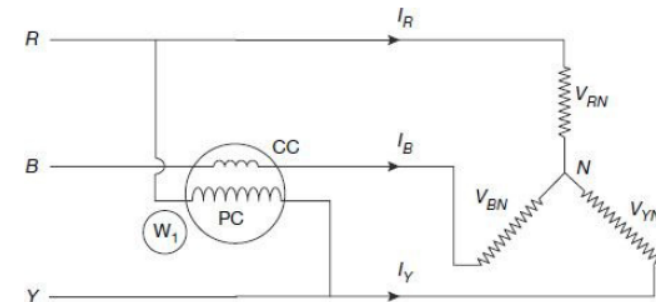
Wattmeter yang sama yang digunakan untuk pengukuran daya aktif juga dapat digunakan untuk mengukur daya reaktif dengan sedikit modifikasi pada koneksi. Mengamati fakta bahwa  $\sin \phi = \cos(90^\circ - \phi)$  wattmeter mungkin begitu terhubung dengan koil saat ini membawa arus beban dan koil tegangan harus memiliki tegangan yang keluar dari fase  $90^\circ$  dengan tegangan aktual dari rangkaian. Dalam keadaan ini, wattmeter akan membaca daya

$$VI \cos(90^\circ - \phi), \text{ atau } VI \sin \phi$$

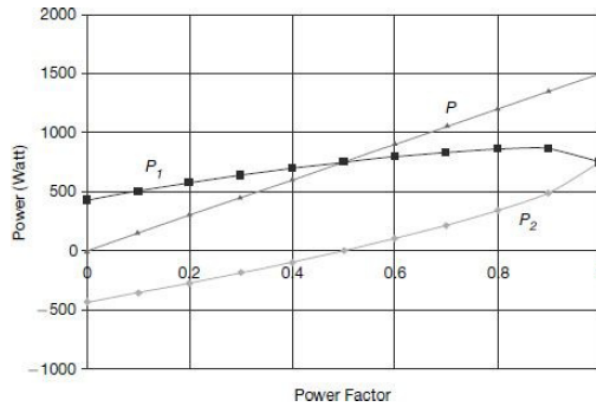
Untuk pengukuran satu fase, sirkuit kumparan tekanan dapat dibuat berperilaku seperti induktif besar dengan memasukkan induktor eksternal secara seri. Ini akan menyebabkan tekanan arus koil untuk berada pada tegangan sebesar  $90^\circ$ , dan dengan demikian wattmeter akan membaca.

$$VI \cos(90^\circ - \phi) = VI \sin \phi = \text{Daya Reaktif}$$

Untuk pengukuran daya reaktif dalam rangkaian dengan beban 3-fase seimbang, satu wattmeter dapat digunakan dengan koneksi yang sesuai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.24, diagram fasor yang sesuai diambil pada Gambar 6.25.



Gambar 6.24. Diagram koneksi untuk pengukuran daya reaktif.



Gambar 6.23. Variasi pembacaan dua wattmeter ( $P_1$  dan  $P_2$ ) dibandingkan dengan daya total ( $P$ ) sehubungan dengan peubah power faktor; beban diasumsikan 5A pada 100V.

### 6.5 Pengukuran Daya Reaktif

Jika  $V$  dan  $I$  adalah nilai rms dari tegangan dan arus dalam rangkaian fase tunggal dan  $\phi$  adalah perbedaan fase-sudut di antara mereka, maka daya aktif di sirkuit adalah,  $VI \cos \phi$ . Daya aktif diperoleh dengan mengalikan tegangan dengan komponen arus yang berada di fase yang sama dengan tegangan (yaitu,  $I \cos \phi$ ). Komponen arus yang ada  $90^\circ$  keluar dari fasa dengan tegangan (misalnya,  $I \sin \phi$ ) disebut komponen reaktif arus dan produk  $VI \sin \phi$  disebut daya reaktif. Pengukuran daya reaktif, bersama dengan daya aktif terkadang penting, karena sudut fase  $\phi$  dari sirkuit dapat diperoleh dari rasio (*daya reaktif*) / (*daya aktif*).

$$\frac{\text{Daya Reaktif}}{\text{Daya Aktif}} = \frac{VI \sin \phi}{VI \cos \phi} = \tan \phi$$

menghasilkan nilai rata-rata  $100 \Omega$  dengan deviasi standar  $0,20 \Omega$ . Kira-kira sebesar 68% dari seluruh resistor yang diukur nilai nominalnya memiliki nilai yang berbeda di antara batas-batas  $\pm 0,20 \Omega$  dari harga rata-rata untuk deviasi standar sebesar  $2\sigma$  atau kira-kira  $\pm 0,40 \Omega$ . Maka 95% dari seluruh hasil pengamatan berada di antara batas-batas  $\pm 0,40 \Omega$  dari harga rata-rata  $100,00 \Omega$ . Tabel 2.2 menunjukkan bahwa setengah dari seluruh hasil pengamatan berada di bawah batas-batas  $\pm 0,6745\sigma$ . Besaran ini disebut sebagai kemungkinan kesalahan ( $r$ ) dengan nilai  $\pm 0,6745\sigma$ .

Tabel 2.2. Luasan di bawah kurva kemungkinan

Deviasi ( $\pm$ ) $\sigma$	Luasan total yang tercakup
0,6745	0,5000
1,0	0,6828
2,0	0,9546
3,0	0,9972

### 2.6. EFEK PEMBEBANAN

Pada kondisi ideal suatu elemen yang digunakan sebagai pengindera, pengkondisi, transmisi dan deteksi sebuah sinyal tidak boleh merubah sinyal asli. Elemen pengindera seharusnya tidak boleh menggunakan energi atau mengambil sedikitpun energi dari sebuah proses pengukuran agar tidak mengubah parameter yang sedang diukur. Namun demikian, pada praktiknya setiap elemen dalam suatu sistem selalu menghasilkan ekstraksi energi dari sistem dan akibatnya terjadi distorsi pada sinyal asli. Distorsi ini dapat berupa pelemahan, distorsi bentuk gelombang, pergeseran fasa, dan lainnya. Akibatnya, pengukuran ideal tidak mungkin terjadi. Ketidakmampuan sistem dalam menjaga pengukuran

sinyal masukan dalam kondisi tidak terdistorsi disebut sebagai efek pembebanan.

Pada sistem pengukuran efek pembebanan tidak hanya terjadi di transduser, namun juga terjadi pada pengkondisi sinyal dan penampil sinyal. Efek pembebanan dapat terjadi karena elemen listrik dan mekanik. Ini karena impedansi dari berbagai elemen yang terhubung dalam suatu sistem. Impedansi mekanis dapat diperlakukan serupa dengan impedans listrik. Kadang-kadang efek pembebanan terjadi karena koneksi instrumen pengukuran dengan cara yang tidak tepat. Misalkan voltmeter terhubung dengan paralel dengan resistansi yang sangat tinggi. Tingginya nilai resistansi voltmeter mengakibatkan arus rangkaian berubah. Ini adalah efek pembebanan voltmeter ketika mereka terhubung secara paralel dengan resistansi yang sangat tinggi. Demikian pula, ammeter memiliki resistansi yang sangat rendah. Jadi jika ammeter dihubungkan secara seri dengan resistansi yang sangat rendah, resistansi total dari rangkaian berubah dan arus rangkaian juga berubah. Ini adalah efek pembebanan dari amperemeter ketika mereka terhubung secara seri dengan resistansi yang sangat rendah. Gambar 2.4 merupakan contoh kasus efek pembebanan pada rangkaian parallel/ pembagi tegangan.

Total daya

$$P_1 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - \phi) = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - 90^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} VI$$
$$P_2 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + \phi) = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + 60^\circ) = -\frac{\sqrt{3}}{2} VI$$

Sehingga penjumlahan kedua wattmeter yang terbaca

$$= P_1 + P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} VI - \frac{\sqrt{3}}{2} VI = 0$$

Oleh karena itu, pada faktor daya nol, pembacaan dari dua wattmeter sama namun tandanya berlawanan.

Perlu dicatat dari diskusi di atas bahwa, pada factor daya di bawah 0,5, salah satunya meteran akan cenderung memberikan hasil negatif lihat Gambar 6.23. plot sifat variasi dalam pembacaan dua wattmeter dengan mengubah factor daya. Namun, dalam banyak kasus, skala meteran tidak ditandai di sisi negatif, dan karena pembacaannya negatif tidak dapat direkam wattmeter. Dalam kasus seperti ini, arus atau kumparan tekanan perlu ditukar agar wattmeter dapat membaca dalam skala positif. Namun pembacaan positif ini harus diambil dengan tanda negatif untuk perhitungan daya total.

### 6.4.6 Power Faktor per satuan

Dengan persatuan factor daya,  $\cos \phi = 1, \phi = 0$

Total daya,  $P = 3 VI \cos \phi = 3 VI \cos 0 = 3 VI$

Pembacaan wattmeter  $W_1$

$$P_1 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - \phi) = \sqrt{3} VI \cos 30^\circ = \frac{3}{2} VI$$

Pembacaan wattmeter  $W_2$

$$P_2 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + \phi) = \sqrt{3} VI \cos 30^\circ = \frac{3}{2} VI$$

Penjumlahan dari  $W_1$  dan  $W_2$ :

$$P_1 + P_2 = \frac{3}{2} VI + \frac{3}{2} VI = 3 VI,$$

dimana nilai ini sama seperti total daya

### 6.4.7 0.5 Faktor Daya

Dengan factor daya,  $\cos \phi = 0.5, \phi = 60^\circ$

Total daya  $P = 3 VI \cos \phi = 3 VI \cos 60^\circ = \frac{3}{2} VI$

$$P_1 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - \phi) = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - 60^\circ) = \frac{3}{2} VI$$

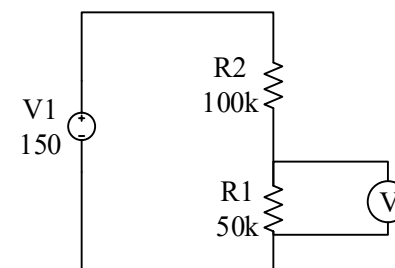
$$P_2 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + \phi) = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + 60^\circ) = 0$$

Sehingga, penjumlahan kedua wattmeter yang terbaca

$$= P_1 + P_2 = \frac{3}{2} VI + 0 = \frac{3}{2} VI$$

### 6.4.8 0 Faktor Daya

Dengan power faktor,  $\cos \phi = 0, \phi = 90^\circ$



Gambar 2.4. Efek pembebanan pada rangkaian pembagi tegangan

Dari Gambar 2.4 sebuah voltmeter dihubungkan di antara dua titik dalam sebuah rangkaian dengan tahanan tinggi. Voltmeter akan bertindak sebagai shunt/ paralel bagi rangkaian yang diukur. Hal ini berakibat memperkecil tahanan ekivalen dalam rangkaian tersebut. Voltmeter akan menunjukkan nilai hasil pengukuran yang lebih rendah dari hasil yang sebenarnya.

## KESIMPULAN

1. Besaran merupakan segala sesuatu yang dapat diukur atau dihitung, dinyatakan dengan angka dan mempunyai satuan.
2. Besaran harus mempunyai 3 syarat yaitu:
  - a. Dapat diukur atau dihitung.
  - b. Dapat dinyatakan dengan angka-angka atau mempunyai nilai.
  - c. Mempunyai satuan.
3. Alat yang digunakan sebagai pembanding atau penunjuk disebut instrumen pengukur. Instrumen ini berfungsi sebagai nilai besaran listrik yang diukur oleh alat tersebut.

4. Perbedaan antara nilai hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya disebut kesalahan (*error*). Kesalahan dikelompokkan menjadi 3 : Kesalahan umum, kesalahan sistematis, dan kesalahan acak.

## LATIHAN SOAL

1. Apa yang disebut besaran dan sebutkan syarat-syarat sesuatu bisa disebut dengan besaran!
2. Apa yang dimaksud dengan kesalahan dalam pengukuran dan jelaskan jenis-jenis kesalahan pengukuran!
3. Pengukuran sebuah tahanan sebanyak sepuluh kali memberikan hasil: 101,2 ohm; 101,1 ohm; 101,3 ohm; 101,0 ohm; 101,5 ohm; 101,3 ohm; 101,2 ohm; 101,4 ohm; 101,3 ohm; 101,1 ohm  
Dengan menganggap bahwa yang ada hanya kesalahan acak, tentukan:
  - (i) Nilai rata-rata
  - (ii) Deviasi standar
  - (iii) Kesalahan yang mungkin ( $\pm 0,6745\sigma$ )
4. Jelaskan apa yang dimaksud dengan efek pembebanan!
5. Berdasarkan pengambilan sampel nilai resistor di sebuah laboratorium diketahui data sebagai berikut (dalam ohm) : 80, 60, 80, 90, 70, 80, 95 Hitunglah nilai standar deviasi dari data tersebut ?

Arus melalui *current coils* tiap wattmeter  $W_2$  adalah  $I_B$  dan tegangan yang bersebrangan dengan potensial  $V_{BY}$ . Arus  $I_B$  mendahului tegangan  $V_{BY}$  dengan sudut  $(30^\circ + \phi)$ , seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.22.

$$P_2 = V_{BY} I_B \cos(30^\circ + \phi) = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + \phi) \quad (6.22)$$

Penjumlahan kedua wattmeter yang terbaca:

$$P_1 + P_2 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - \phi) + \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + \phi) = 3 VI \cos \phi \quad (6.23)$$

Itu merupakan daya yang terpakai oleh beban, ditambah bersama tiga fasa.

Jadi, pada faktor daya apapun, daya total yang dikonsumsi oleh beban akan penjumlahan dua wattmeter yang terbaca.

Cara untuk mengetahui faktor daya beban, jika tidak diketahui dapat dilakukan beberapa manipulasi.

Dengan menggunakan persamaa (6.21) dan (6.22), perbedaan pembacaan dua wattmeter:

$$P_1 - P_2 = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - \phi) - \sqrt{3} VI \cos(30^\circ + \phi) = \sqrt{3} VI \sin \phi \quad (6.24)$$

Mengambil rasio persamaan (6.24) dengan (6.23),

atau,

$$\phi = \tan^{-1} \left( \sqrt{3} VI \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right) \quad (6.25)$$

Sehingga, factor dayanya adalah

$$\cos \phi = \cos \left[ \tan^{-1} \left( \sqrt{3} VI \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right) \right]$$

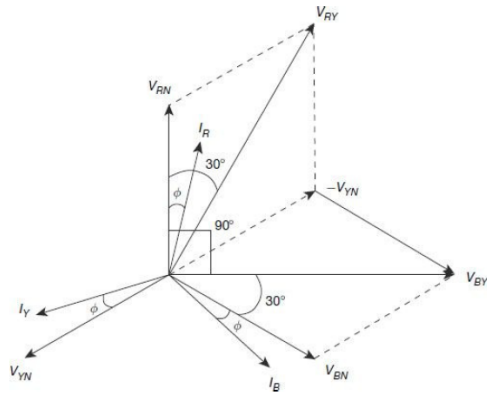
## BAB III ALAT UKUR ANALOG

### 3.1. PENDAHULUAN

Perangkat analog adalah perangkat di mana output atau tampilan adalah fungsi waktu yang berkesinambungan dan memiliki hubungan yang konstan dengan inputnya. Instrumen pengukuran diklasifikasikan menurut 2 hal, yakni kuantitas diukur dengan instrumen dan prinsip operasi. Tiga prinsip-prinsip operasi tersedia:

- (i) elektromagnetik, yang memanfaatkan magnet efek dari arus listrik;
- (ii) elektrostatik, yang memanfaatkan gaya antara listrik konduktor bermuatan;
- (iii) elektro-termal, yang memanfaatkan efek pemanasan.

Alat ukur listrik dan meter digunakan untuk menunjukkan secara langsung nilai arus, tegangan, daya atau energi. Dalam bab ini, kita akan mempertimbangkan elektromekanis meter (input adalah sebagai sinyal listrik yang menghasilkan gaya mekanik atau torsi sebagai output) yang dapat dihubungkan dengan komponen yang sesuai tambahan untuk bertindak sebagai ammeter dan voltmeter. Instrumen atau meter analog yang paling umum adalah yang permanen magnet alat kumparan bergerak dan digunakan untuk mengukur arus dc atau tegangan suatu sirkuit listrik. Di sisi lain, indikasi arus bolak-balik dan voltmeters harus mewakili nilai rms dari arus, atau voltase, masing-masing, diterapkan instrumen.



Gambar 6.22. diagram fasor untuk 3-fasa beban terkoneksi-star stabil.

$V_{RN}$ ,  $V_{BN}$ , dan  $V_{YN}$  merupakan tegangan fasa dan  $I_R$ ,  $I_B$ , dan  $I_Y$  merupakan arus fasa pada sistem 3-fasa beban terkoneksi star seimbang untuk bahan studi.

Untuk sistem yang seimbang, tegangan fasa,  $V_{RN} = V_{BN} = V_{YN} = V$

Dan untuk sistem terkoneksi star,

Garis tegangan,  $V_{RN} = V_{BN} = V_{YN} = \sqrt{3}V$

Garis arus  $I_R = I_B = I_Y = I$

*Faktor daya* =  $\cos \phi$ , dimana  $\phi$  merupakan sudut tiap arus fasa yang lag terhadap tegangan fasa.

Arus melalui current coils tiap wattmeter  $W_1$  adalah  $I_R$  dan tegangan yang bersebrangan dengan potensial  $V_{RY}$ . Arus  $I_R$  mendahului tegangan  $V_{RY}$  dengan sudut  $(30^\circ - \phi)$ , seperti yang ditunjukkan pada gambar 7,25.

Jadi, daya yang terbaca  $W_1$  adalah,

$$P_1 = V_{RY} \times I_R \cos(30^\circ - \phi) = \sqrt{3} VI \cos(30^\circ - \phi) \quad (6.21)$$

## 3.2 PRINSIP KERJA ALAT UKUR ANALOG

Instrumen analog dapat diklasifikasikan sesuai dengan prinsip operasi yang mereka gunakan. Efek yang digunakan di antaranya:

1. Efek magnetik
2. Efek pemanasan
3. Efek elektrostatik
4. Efek elektromagnetik
5. Efek hall

Mayoritas instrumen analog termasuk moving coil, moving iron dan elektrodinamik memanfaatkan efek magnetik. Efek panas yang dihasilkan oleh arus dalam konduktor digunakan dalam instrumen termokopel dan hotwire. Efek elektrostatik digunakan dalam voltmeter elektrostatik. Efek induksi elektromagnetik digunakan dalam induksi pengukur watt dan meter energi induksi.

Perhitungan wattmeter  $W_1, P_1 = -V_{YR}x (i_R - i_Y)$

Perhitungan wattmeter  $W_2, P_2 = V_{BY}x (i_B - i_R)$

Penjumlahan kedua wattmeter yang terbaca:

$$= P_1 + P_2 = -V_{YR}x (i_R - i_Y) + V_{BY}x (i_B - i_R) \quad (5.1)$$

$$= V_{YR}x i_Y + V_{BY}x i_B - i_Rx (V_{YR} + V_{BY}) \quad (6.20)$$

Berdasarkan hukum kirchhof tegangan, penjumlahan tegangan drop pada kalang tertutup sama dengan nol, yaitu:

$$V_{YR} + V_{BY} + V_{RB} = 0$$

atau,

$$V_{YR} + V_{BY} = -V_{RB}$$

Sehingga dari persamaan (6.20) kita dapat menulis ulang,

$$P_1 + P_2 = V_{YR}x i_Y + V_{BY}x i_B + V_{RB}x i_R \quad (6.20)$$

**Oleh karena itu, jumlah pembacaan wattmeter sama dengan jumlah daya yang terpakai oleh beban. Sekali lagi, ini terlepas dari kenyataan apakah beban yang dipakai stabil atau tidak.**

### 6.4.5 Pengaruh Faktor Daya pada Pembacaan Wattmeter

Diagram fasor untuk beban terkoneksi-star ditunjukkan pada gambar 6.20. sedangkan diagram fasor dengan beban yang seimbang ditunjukkan pada gambar 6.22.



$$I_R + I_B = -I_Y$$

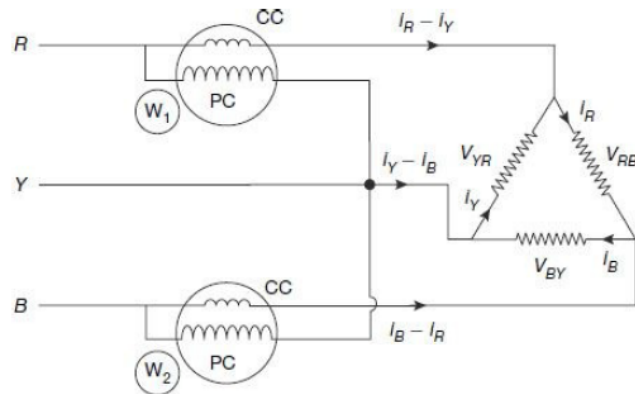
Sehingga dari persamaan (6.19) kita dapat menuliskan ulang:

$$P_1 + P_2 = V_{RN} \times I_R + V_{YN} \times I_Y + V_{BN} \times I_B \quad (6.18)$$

**Sehingga dapat disimpulkan bahwa penjumlahan dua wattmeter yang terbaca sama dengan jumlah daya yang terpakai oleh beban. Ini terlepas dari fakta bahwa beban stabil atau tidak.**

#### 6.4.4 Sistem Koneksi-Delta

Dua wattmeter dapat digunakan untuk pengukuran jumlah daya pada 3-fasa sistem koneksi-delta. skematik rangkain koneksi pada kasus ini ditunjukkan pada gambar 6.21



Gambar 6.21. 2-wattmeter dengan metode beban koneksi-delta.

Current coils tiap wattmeter terhubung pada garss R dan B, dan tegangan kumpran terhubung antara garis R dan Y, B dan Y masing-masing.

Daya yang terpakai beban

$$P = V_{RB} \times i_R + V_{YR} \times i_Y + V_{BY} \times i_B \quad (6.19)$$

Diperlukan tiga jenis torsi untuk operasi instrumen indikasi yang memuaskan, di antaranya adalah:

#### Deflecting Torque

Beberapa defleksi pada suatu instrumen yang ditemui didasarkan oleh efek total dari defleksi torsi/ gaya, kontrol torsi/ kekuatan dan redaman torsi/ kekuatan. Nilai defleksi torsi tergantung pada sinyal listrik yang akan diukur; torsi / kekuatan ini membantu dalam memutar instrument bergerak dari posisi nol. Sistem yang menghasilkan torsi membelok disebut sistem pembelok (*deflecting system*).

#### Controlling Torque

Kendali torsi/ gaya ini berlawanan dengan defleksi torsi/ gaya. Saat defleksi torsi dan pengendalian torsi sama besarnya maka gerakan akan di posisi stabil atau dalam keseimbangan. Pegas spiral atau gravitasi biasanya digunakan untuk mengendalikan torsi. Sistem yang menghasilkan pengendalian torsi disebut sistem pengendalian. Fungsi dari sistem pengendali adalah:

- Untuk menghasilkan torsi yang sama dan berlawanan dengan defleksi torsi pada posisi akhir pointer saat stabil agar defleksi pointer menuju pada sebuah nilai arus tertentu
- Untuk mengembalikan sistem yang bergerak ke posisi nol ketika gaya yang menyebabkan sistem instrumen bergerak untuk membelokkan hilang.

Torsi pengontrol dalam instrumen indikasi hampir selalu diperoleh dengan pegas, lebih jarang, dengan gravitasi.

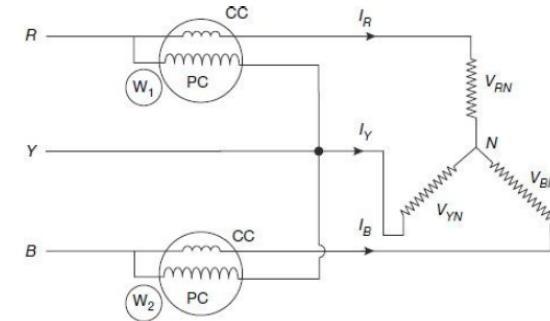
### Dumping Torque

Gaya redaman umumnya bekerja berlawanan arah dengan gerakan sistem bergerak. Pergerakan gaya redaman yang berlawanan ini, tanpa osilasi atau berosilasi sangat kecil membuat sistem bergerak berhenti pada posisi akhir yang dibelokkan dengan cepat. Gesekan udara, gesekan fluida dan arus eddy memberikan torsi/ gaya redaman untuk bergerak. Perlu dicatat bahwa tidak semua gaya redaman mempengaruhi defleksi kondisi tunak yang disebabkan oleh gaya atau torsi yang dibelokkan. Dengan kecepatan sudut dari sistem yang bergerak, intensitas gaya redaman meningkat; karena itu, efek paling besar ketika sistem berputar dengan cepat dan bernilai nol ketika rotasi sistem adalah nol. Dalam penjelasan pada berbagai jenis instrumen, ekspresi matematika untuk torsi redaman diperhitungkan pertimbangan.

Ketika torsi defleksi jauh lebih besar dari torsi pengontrol, sistemnya disebut *underdamped*. Jika torsi defleksi sama dengan torsi pengontrol, itu disebut *critically damped*. Ketika torsi defleksi jauh lebih kecil daripada torsi pengontrol, sistem berada dalam kondisi *overdamped*. Gambar 3.1 menunjukkan variasi defleksi ( $d$ ) dengan waktu untuk sistem *underdamped*, *critically damped* dan *overdamped*.

### 6.4.3 Sistem koneksi star

Koneksi untuk penjumlahan daya pada kasus koneksi star beban 3-fase ditunjukkan pada gambar 6.20.



Gambar 6.20. metode 2-wattmeter untuk beban koneksi star.

*Current-coils* pada tiap wattmeter terhubung pada garis R dan B, dan tegangan kumparan terhubung pada garis R dan Y, B dan Y masing-masing.

Daya yang terpakai oleh beban

$$P = V_{RN} \times I_R + V_{YN} \times I_Y + V_{BN} \times I_B \quad (6.16)$$

$$W_1, P_1 = V_{RY} \times I_R = (V_{RN} - V_{YN}) \times I_R$$

$$W_2, P_2 = V_{BY} \times I_B = (V_{BN} - V_{YN}) \times I_B$$

Penjumlahan dua wattmeter yang terbaca:

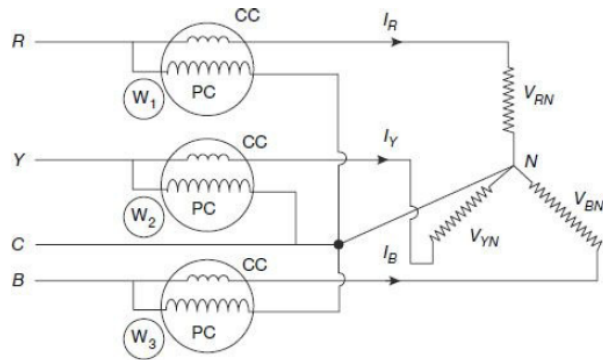
$$\begin{aligned} &= P_1 + P_2 = (V_{RN} - V_{YN}) \times I_R + (V_{BN} - V_{YN}) \times I_B \\ &= V_{RN} \times I_R + V_{BN} \times I_B - V_{YN} \times (I_R + I_B) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Dari hukum Kirchof, penjumlahan arus pada N harus sama dengan nol, yaitu:

$$I_R + I_Y + I_B = 0$$

atau,

Wattmeter yang terhubung untuk mengukur daya pada sistem 3-fasa 4-kabel ditunjukkan pada gambar 6.19.



Gambar 6.19. Perhitungan daya pada sistem 3-fasa 4-kabel

Dalam hal ini, titik umum dari tiga kumparan tekanan bertepatan dengan N netral dari sistem. Tegangan di setiap kumparan potensial dengan efektif tegangan per-fase yang sesuai. Arus melalui current coils dari tiga wattmeter tidak lain hanyalah arus fase dari fase yang sesuai.

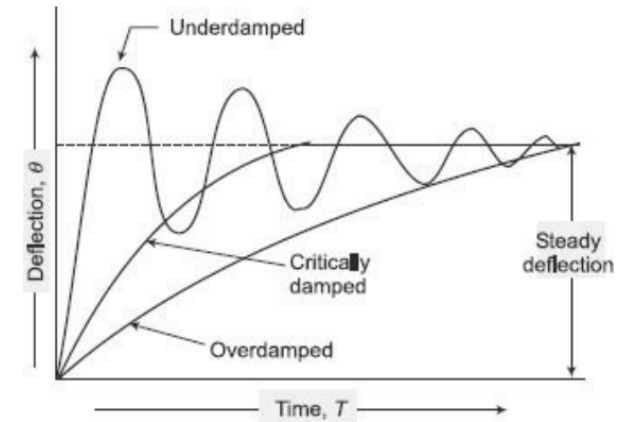
Jumlah dari tiga pengukuran wattmeter dalam kasus ini akan menjadi:

$$P_1 + P_2 + P_3 = V_{RN} \times I_R + V_{YN} \times I_Y + V_{BN} \times I_B$$

Sehingga, hasil penjumlahan dari tiga wattmeter tersebut merupakan jumlah daya yang terpakai oleh beban.

### 6.4.2 Metode Dua-Wattmeter

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan untuk mengukur daya 3-fase. Metode ini juga sangat berguna ketika beban tidak stabil.



Gambar 3.1 Kurva *Damping Torque*

## 3.3 KONSTRUKSI ALAT UKUR ANALOG

### 3.3.1 Sistem Bergerak (*Moving System*)

Sistem bergerak harus memiliki sifat sebagai berikut:

1. Bagian yang bergerak harus ringan.
2. Gaya gesekan harus minimal.

Persyaratan ini harus dipenuhi agar daya yang diperlukan oleh instrumen untuk bekerja bernilai kecil. Kekuatan sebanding dengan berat bagian yang bergerak dan gaya gesek berbanding terbalik dengan gerakan. Sistem bergerak dapat dibuat ringan sebisa mungkin dengan menggunakan aluminium. Gaya gesek dapat

dikurangi dengan menggunakan bantalan *spindlemounted jewel* dan dengan menyeimbangkan sistem dengan hati-hati.

Gaya atau torsi dihasilkan oleh elemen bergerak dari instrumen listrik cukup kecil agar konsumsi daya dari instrumen yang tetap rendah sehingga sinkronisasi instrumen dengan rangkaian menghasilkan perubahan minimum dalam kondisi rangkaian yang ada. Karena tingkat daya rendah, pertimbangan dari berbagai metode yang mendukung elemen bergerak menjadi sangat penting. Dengan gaya kerja yang kecil, gaya gesekan harus dijaga tetap minimum agar instrumen membaca dengan benar dan tidak berubah-ubah dalam bergerak dan dapat diandalkan. Beberapa jenis instrument pendukung dari jenis berikut:

1. *Suspension*
2. *Taut suspension*
3. Pivot dan bantalan berbentuk permata

### 3.3.2 Sistem pengendalian

Torsi pengendalian dihasilkan oleh pegas atau kadang-kadang oleh gravitasi.

#### 1. Spring Control

Pada *hair-spring* biasanya biasanya dari perunggu-fosfor yang dipasang pada sistem penggerak, digunakan dalam menunjukkan instrumen untuk tujuan kontrol, digunakan dalam instrumen penunjuk untuk tujuan pengendalian, susunan

amplitude yang cukup besar. Getaran ini dapat menimbulkan masalah saat mencatat posisi penunjuk pada skala alat ukur. Kesalahan ini karena getaran dapat dihindari dengan mendesain elemen bergerak yang memiliki frekuensi yang jauh dari frekuensi sumber tegangan.

#### 8. Kesalahan suhu

Perubahan suhu mungkin memengaruhi akurasi pada wattmeter dengan mengubah resistansi kumparan. Suhu perubahan mungkin berubah karena perubahan suhu ruangan atau bahkan karena efek pemanasan konduktor yang dialiri arus. Perubahan suhu juga memengaruhi kekakuan pegas, dengan demikian kesalahan dalam proses defleksi akan membesar. Instrumen presisi tinggi dipasang dengan resistor kompensasi suhu yang cenderung menetralkan efek suhu yang bervariasi.

## 6.4 Pengukuran Daya Dalam Sistem 3 Fase

### 6.4.1 Sistem tiga fasa tiga pengkabelan

#### 1. Sistem tiga fasa tiga kabel

Perhitungan daya pada sistem 3-fasa 3-kabel menggunakan tiga wattmeter yang sudah dijelaskan pada sesi 6.6.1

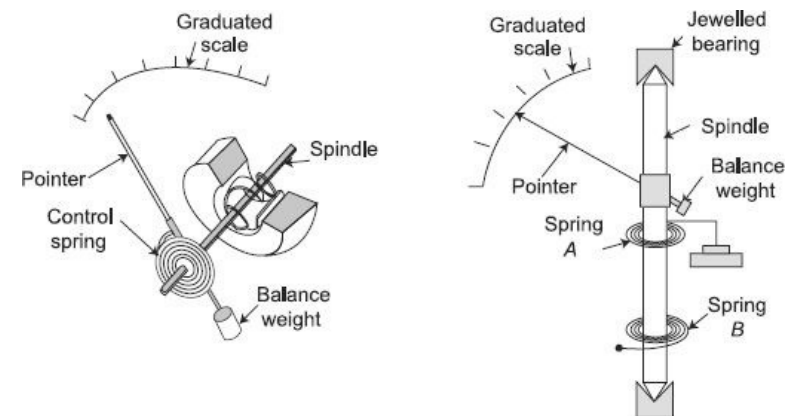
#### 2. Sistem tiga fasa empat kabel

Instrumen elektrodinamometer astatic dibangun dengan dua setyang sama dan kumparan bergerak dipasa pada poros yang sama. Sepasang kumparan yang tetap terhubung bertentangan dengan medan magnet. Demikian pula, pasangan gulungan yang bergerak juga terhubung untuk menghasilkan medan magnet yang berlawanan arah. Ini yang menyebabkan pembelokan torsi yang bekerja pada dua kumparan bergerak pada arah yang sama. Defleksi pointer karena aksi aditif dari dua kumparan bergerak. Namun, sejak dua bidang di dua pasang gulungan tetap dan bergerak dalam oposisi, setiap bidang eksternal akan memengaruhi dua set pasangan berbeda. Medan eksternal akan mengurangi medan dalam satu kumparan dan akan meningkatkan medan di kumparan lain dengan jumlah yang sama. Oleh karena itu, membelokkan torsi yang dihasilkan oleh satu kumparan akan meningkat dan kumparan lainnya berkurang dengan nilai yang identik. Ini membuat torsi murni karena medan magnet eksternal menjadi nol.

7. Kesalahan yang diakibatkan oleh getaran sistem yang bergerak Torsi sesaat pada sistem yang bergerak bervariasi secara siklis pada frekuensi dua kali lipat tegangan dan arus (6.10). Jika ada bagian dari sistem yang bergerak, seperti pegas atau pointer, memiliki frekuensi alami yang dekat dengan torsi, kemudian resonansi dapat terjadi dengan tidak disengaja. Dalam kasus seperti ini, sistem yang bergerak dapat bergetar dengan

skematiknya ditunjukkan di Gambar 3.4 (A) dan spring control yang sebenarnya digunakan dalam instrumen ditampilkan dalam Gambar 3.4 (B).

Untuk memberikan torsi pengontrol yang berbanding lurus dengan sudut defleksi sistem yang bergerak, jumlah belitan pada pegas harus cukup besar, sehingga defleksi setiap satuan panjang kecil. Tekanan pegas harus dibatasi pada nilai tertentu sehingga tidak ada pemasangan permanen.



Gambar 3.2 (A) Spring Control



Gambar 3.2 (B) Spring Control di instrumen

## 2. Gravity Control

Dalam instrumen pengendalian gravitasi, beban kecil dipasang ke sistem yang bergerak sedemikian rupa sehingga menghasilkan torsi pemulihan atau pengontrol ketika sistem dibelokkan. Torsi pengendali, ketika defleksi didefinisikan sebagai  $\theta$ , adalah  $\omega l \sin \theta$ , di mana  $W$  adalah beban kendali dan  $l$  adalah jaraknya dari sumbu rotasi dari sistem bergerak, oleh karena itu, proporsional hanya dengan sinus sudut defleksi, tidak seperti pada kontrol pegas, berbanding lurus dengan sudut defleksi. Instrumen pengendali gravitasi harus jelas digunakan dalam posisi vertikal agar proses kendali dapat beroperasi.

## 3. Perbandingan Spring dan Gravity Control

Kontrol gravitasi memiliki keuntungan sebagai berikut bila dibandingkan dengan pegas:

- Hal ini lebih murah
- Tahan terhadap suhu
- Tidak memburuk dengan waktu

Pertimbangkan instrumen di mana membelokkan torsi TD berbanding lurus dengan arus yang akan diukur.

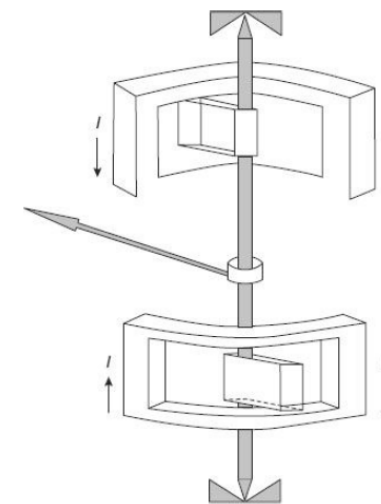
### 3.3.3 Sistem Damping

Ada tiga sistem redaman umumnya digunakan, antara lain:

1. Redaman gesekan udara

## 6. kesalahan medan magnet yang menyimpang

Operasi dalam instrumen tipe elektrodinamometer menjadi lemah, perawatan khusus harus dilakukan untuk melindungi instrumen ini dari medan magnet eksternal. Karena itu, instrumen ini harus dilindungi dari efek medan magnet yang menyimpang. Besi yang dilaminasi pelindung instrumen laboratorium portable, sementara selubung baja disediakan sebagai perisai bagi wattmeter yang terpasang pada panel. Namun, pengukuran daya yang presisi tidak dilengkapi dengan perisai logam, untuk itu menjelaskan kesalahan karena Eddy-current, dan juga beberapa kesalahan DC karena magnetisasi permanen dari perisai logam di awah pengaruh medan magnet eksternal. Kebanyakan wattmeter diproduksi memiliki sistem astatic seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.18.



Gambar 6.18. sistem astatic pada elektrodinamometer tipe wattmeter

tekanan menggunakan kawat tipis dan hanya membawa arus ke kumparan tekanan. Namun, arus dalam kumparan kompensasi memiliki arah yang berlawanan dengan arus current coil utama yang menciptakan flusk. Medan magnet yang dihasilkan disebabkan oleh current coil, efek dari arus kumparan tekanan yang mengalir di current coil meng-nol-kan satu sama lain. Sehingga kesalahan karena arus kumparan tekanan mengalir pada current coil dibatalkan dan wattmeter menunjukkan daya yang sebenarnya.

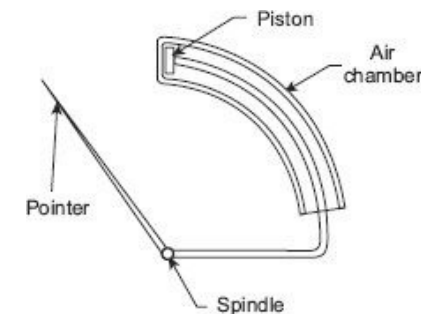
#### 5. Kesalahan Eddy-Current

Tindakan pencegahan yang memadai untuk diadopsi, Eddy-current dapat diinduksi oleh bahan logam pada instrumen bahkan dalam ketebalan konduktor dengan medan magnetic yang bolak-balik pada current coil. Eddy-current ini menghasilkan medan magnet dan mengubah besarnya dan fase medan magnet current coil utama, dengan demikian kesalahan pengukuran daya. Kesalahan yang disebabkan oleh Eddy-current tidak mudah diperkirakan, dan bisa menjadi keberatan jika bagian logam tidak hati-hati dihindari dari current coil. Bahkan, logam padat di kumparan pendukung dan bagian structural harus dijaga seminimal mungkin. Logam apapun yang digunakan dijauhan dan dipilih untuk memiliki resistivitas tinggi sehingga dapat mengurangi Eddy-current yang terinduksi di dalamnya. Kondukto yang terhubung ground direkomendasikan untuk membatasi current coil generasi Eddy-current dengan konduktor yang tebal.

2. Redaman gesekan cairan
3. Redaman arus Eddy

#### 1. Redaman Gesekan Udara

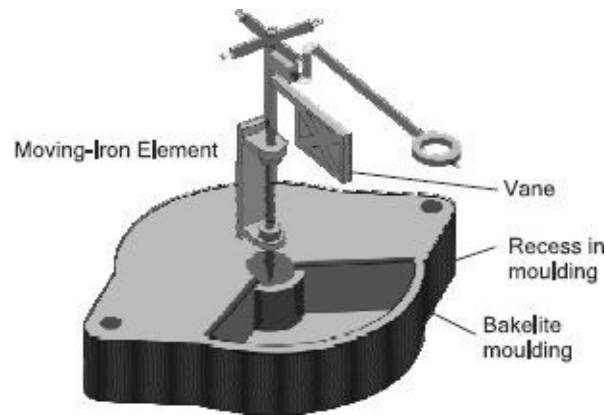
Dalam metode ini, piston aluminium ringan dipasang pada sistem penggerak dan bergerak dalam ruang udara tertutup di salah satu ujungnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6. Penampang ruang ini bisa berbentuk lingkaran atau persegi panjang. Jarak antara piston dan sisi ruangan harus kecil dan seragam. Jika piston bergerak cepat ke dalam ruang, udara di ruang tertutup dikompresi dan tekanan berlawanan dengan gerakan piston (dan karenanya, dari keseluruhan sistem yang bergerak). Jika piston bergerak keluar dari ruang dengan cepat, tekanan di ruang tertutup turun, dan tekanan di sisi terbuka piston lebih besar daripada di sisi yang berlawanan.



Gambar 3.6 *Open-end gesekan udara redaman*

Kadang-kadang alih-alih piston, baling-baling, yang dipasang pada poros sistem penggerak, bergerak dalam kotak berbentuk

sektor tertutup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.7** Air-gesekan redaman menggunakan baling-baling

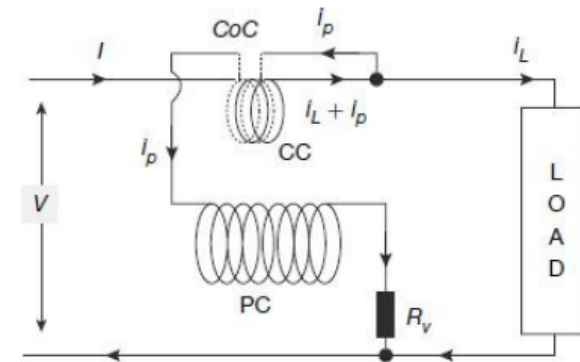
## 2. Redaman Gesekan Cairan

Dalam jenis redaman ini, baling-baling ringan, yang dipasang pada poros sistem yang bergerak, mencelupkan ke dalam panci berisi minyak peredam dan harus benar-benar terendam oleh minyak. Ini diilustrasikan pada Gambar 3.8 (a). Tarikan gesekan pada cakram selalu berlawanan arah dengan gerakan. Tidak ada gaya gesekan saat disk diam. Pada sistem kedua [Gambar 3.8 (b)], peningkatan redaman diperoleh dengan menggunakan baling-baling.

*pembacaan wattmeter = daya beban + daya hilang pada PC*

Pada kasus arus beban kecil, kehilangan daya pada current coil rendah sehingga koneksi pada gambar 6.16. (a) akan memiliki kesalahan pengukuran yang relatif kecil. Di sisi lain, ketika arus beban besar, arus bercabang melalui kumparan tekanan yang relatif kecil dan kesalahan dalam pengukuran akan lebih kecil jika menggunakan koneksi gambar 6.16.(b)

Kesalahan karena percabangan arus keluar melalui kumparan tegangan dapat diminimalkan oleh penggunaan kumparan kompensasi seperti yang ditunjukkan secara skematis pada gambar 6.17.

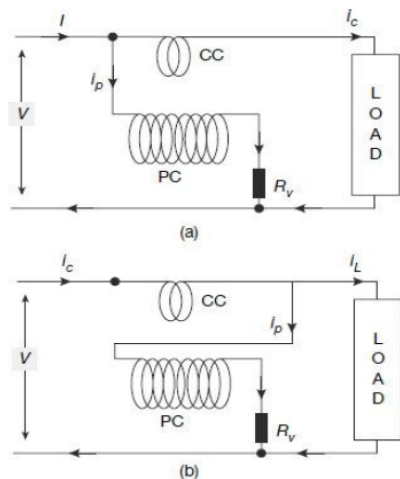


Gambar 6.17. diagram skematis koneksi untuk wattmeter terkompensasi

Dalam koneksi terkompensasi, current coil terdiri dari dua gulungan, masing-masing berliku memiliki jumlah putaran yang sama. Kedua belitan dibuat sebisa mungkin identik. Salah satu dari dua belitan CC terbuat dari kawat berat yang membawa arus beban ditambah arus pada kumparan tekanan. Gulungan lainnya dihubungkan secara seri dengan kumparan



Ada dua metode alternatif koneksi pada wattmeter untuk perhitungan daya pada rangkaian. Ditunjukkan pada gambar 6.16. pada kedua mode itu kesalahan pengukuran dikarenakan *losses* pada kumparan tekanan dan kumparan arus.

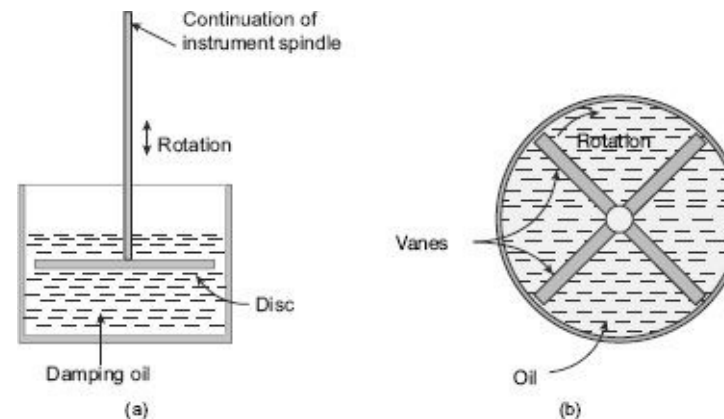


Gambar 6.16. koneksi wattmeter

Pada gambar 6.15 (a), kumparan tekanan terhubungkan parallel dengan sumber tegangan, sehingga kumparan tekanan mengukur tegangan yang melalui beban, dan tegangan drop yang melalui current coil. Pembacaan wattmeter pada kondisi ini termasuk daya yang hilang pada current coil, bersamaan dengan daya yang terpakai oleh beban.

$$\text{pembacaan wattmeter} = \text{daya beban} + \text{daya hilang pada CC}$$

Pada gambar 6.11 (b), current coil terhubung seri dengan sumber tegangan, yang membawa arus beban ditambah arus kumparan tekanan. Oleh karena itu, pembacaan wattmeter termasuk dengan daya yang dikonsumsi beban, kehilangan daya dalam kumparan tekanan.



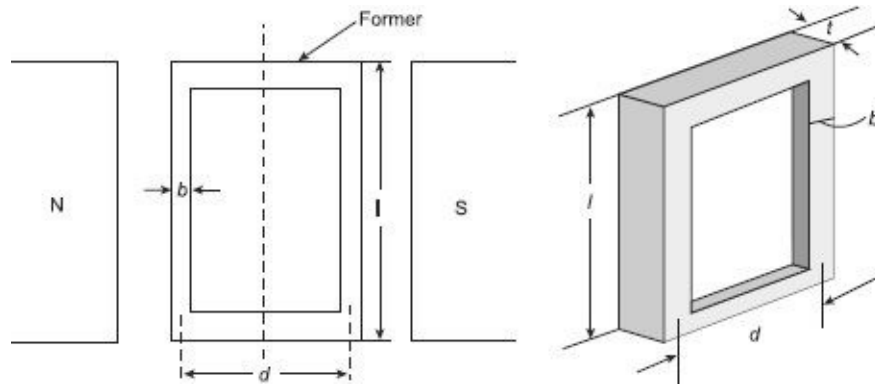
Gambar 3.8 Cairan-gesekan redaman

### 3. Redaman Arus Eddy

Ketika selempar bahan konduktor bergerak dalam medan magnet untuk memotong garis-garis gaya, arus eddy diatur di dalamnya dan ada gaya antara arus ini dan medan magnet, yang selalu berlawanan arah dengan gerakan. Gaya tersebut sebanding dengan besar arus dan kekuatan medan. Besarnya arus sebanding dengan kecepatan gerakan konduktor, dan dengan demikian, jika medan magnet konstan, gaya redaman sebanding dengan kecepatan sistem yang bergerak dan nol bila tidak ada pergerakan sistem.

### (i) Torsi Redaman Arus Eddy Berbahan Logam

Gambar 3.9 menunjukkan mantan bergerak logam di bidang



magnet permanen.

**Gambar 3.9** redaman eddy-saat ini pada mantan logam

Di mana:

$B$  = kekuatan medan magnet; (Wb / m<sup>2</sup>)

$\omega$  = kecepatan angular mantan; (Rad / s)

$l$  = Panjang mantan; (M)

$t$  = ketebalan mantan; (M)

$b$  = lebar mantan; (M)

$d$  = luasnya mantan; (M)

$\rho$  = Resistivitas bahan bekas; (W m)

$$\text{kecepatan linear yang dibentuk } v = \left(\frac{d}{2}\right) \omega$$

Kemudian, impedansi =  $r_p + R_V = R_p$

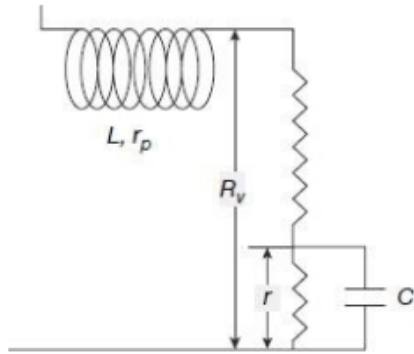
Sehingga error yang terjadi pada induktansi kumparan tekanan dapat secara substansial dihilangkan.

### 3. Error karena Kapasitansi Kumparan Tekanan

Tegangan, atau rangkaian kumparan tekanan mungkin memiliki kapasitansi yang permanen sebagai tambahan induktansi. Efek kapasitansi ini disebabkan oleh kapasitansi antar belitan dan resistansi eksternal yang terhubung seri. Efek dari kapasitansi kumparan tekanan berlawanan dengan induktansi. Oleh karena itu wattmeter membaca faktor daya lagging dan faktor daya leading pada beban yang tinggi. Pembacaan wattmeter yang sebenarnya perlu dikoreksi yang sesuai untuk mendapatkan hasil yang benar. Pengaruh kapasitansi (serta induktansi) bervariasi dengan variable frekuensi suplai.

### 4. Kesalahan karena koneksi

dengan kumparan tekanan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.15.



Gambar 6.15. Kompensasi untuk induktansi kumparan tekanan

Total impedansi rangkaian gambar 6.15 dapat ditulis sebagai:

$$Z_p = (r_p + R_v - r) + j\omega L + \frac{r - j\omega Cr^2}{1 + \omega^2 C^2 r^2}$$

Untuk membuat rangkaian yang bersifat resistif murni, kita dapat mendesain parameter rangkaian yang memiliki *power frequencies*

$$\omega^2 C^2 r^2 \ll 1$$

Kemudian tulis ulang keseluruhan impedansi pada kumparan tekanan sebagai

$$\begin{aligned} Z_p &= (r_p + R_v - r) + j\omega L + r - j\omega Cr^2 \\ &= r_p + R_v + j\omega(L - Cr^2) \end{aligned}$$

Jika menggunakan desain yang layak, kita dapat menggunakan

$$L = Cr^2$$

Dihasilkan secara dinamis emf di bekas

$$E_e = 2Blv = 2Bl \frac{d}{2} \omega = Bld\omega$$

Resistansi arus eddy

$$R_e = \frac{\rho 2(d+l)}{bt}$$

Arus eddy

$$I_e = \frac{E_e}{R_e} = \frac{Blbt d\omega}{2\rho(d+l)}$$

Gaya redaman/ damping force

$$F_d = BI_e l = \frac{B^2 l^2 b t d \omega}{2\rho(d+l)}$$

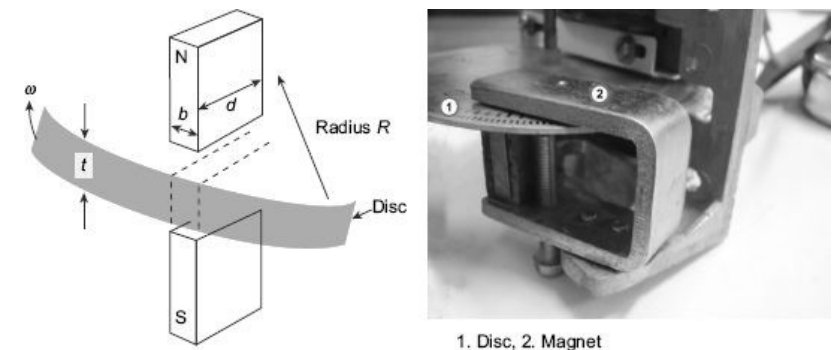
Damping torque

$$T_d = F_d \times d = \frac{B^2 l^2 b t d^2 \omega}{2\rho(d+l)}$$

Konstanta redaman  $k_d = \frac{T_d}{\omega} = \frac{B^2 l^2 b t d^2}{2\rho(d+l)} \text{ Nm/rad s}^{-1}$ .

### (ii) Eddy-Current Damping Torsi Logam Disc

Gambar 3.10 menunjukkan disc logam berputar di bidang magnet permanen.



Gambar 3.10 redaman eddy-saat pada disk logam 2

Di mana:

$B$  = kerapatan fluks medan magnet; ( $\text{Wb} / \text{m}^2$ )

$\omega$  = kecepatan sudut dari disc; ( $\text{Rad} / \text{s}$ )

$t$  = ketebalan disc; ( $\text{M}$ )

$b$  = lebar magnet permanen; ( $\text{M}$ )

$d$  = panjang magnet permanen; ( $\text{M}$ )

$\rho$  = resistivitas material disc; ( $\Omega \text{ m}$ )

$R$  = jari-jari diukur dari pusat tiang ke pusat disc; ( $\text{M}$ )

Mengingat ggl diinduksi dalam cakram di bawah permukaan kutub saja, oleh karena itu, ggl diinduksi di bagian bawah magnet.

$$E_c = Blv = BdR\omega$$

$$\text{Resistansi arus eddy di bawah kutub} = \frac{\rho d}{bt}$$

Jalur aktual untuk arus eddy tidak terbatas pada bagian cakram di bawah magnet tetapi lebih besar dari ini. Oleh karena itu, untuk memperhitungkan faktor ini, resistansi aktual diambil sebagai  $k$  kali  $\frac{\rho d}{bt}$ . Oleh karena itu resistansi adalah

$$R_c = k \frac{\rho d}{bt}$$

Di mana  $k$  adalah konstanta yang tergantung pada posisi radial cakram dan kutub.

$$CF = \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha \cos(\varphi - \alpha)}$$

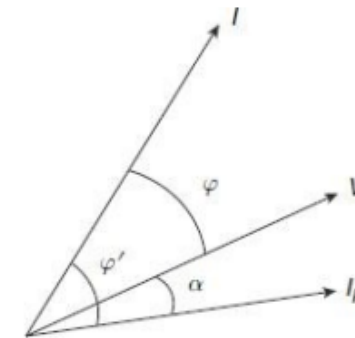
Daya sebenarnya dapat didapatkan dari nilai yang terbaca pada wattmeter menggunakan koreksi faktor sebagai:  
daya sebenarnya

$$= CF \times \text{nilai yang terbaca pada wattmeter}$$

daya sebenarnya

$$= \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha \cos(\varphi - \alpha)} \times \text{nilai yang terbaca pada wattmeter}$$

Untuk *power factor loads* leading, diagram fasor wattmeter akan ditunjukkan pada gambar 6.14



Gambar 6.14 diagram faso wattmeter dengan induktansi tekanan kumparan saat beban leading.

daya sebenarnya

$$= \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha \cos(\varphi + \alpha)} \times \text{nilai yang terbaca pada wattmeter}$$

## 2. Kompensasi untuk Induktansi Kumparan Tekanan

Sebuah wattmeter dapat dikompensasi untuk induktansi kumparan tekanan dengan cara menghubungkan nilai awal dari kapasitansi yang dan resistansi eksternal yang terhubung seri

Pada kasus lain, perbedaan fase antara arus tekanan kumparan dan arus kumparan adalah

$$\varphi' = \varphi - \alpha$$

Dari persamaan (6.11) defleksi wattmeter akan menjadi

$$\theta' = \frac{I_p I}{K} \cos \varphi' \cdot \frac{dM}{d\theta}$$

$$\theta' = \frac{V}{Z_p K} I \cos(\varphi - \alpha) \cdot \frac{dM}{d\theta}$$

Hubungan  $R_p = Z_p \cos \alpha$  pada rangkaian tekanan kumparan, defleksi wattmeter dapat dituliskan sebagai VI dM

$$\theta' = \frac{VI}{R_p K} \cos \alpha \cos(\varphi - \alpha) \cdot \frac{dM}{d\theta} \quad (6.14)$$

Jika tidak memiliki nilai induktansi,  $Z_p = R_p$  dan  $\alpha = 0$ ; wattmeter akan membaca nilai daya sebenarnya, didapat dari:

$$\theta = \frac{VI}{R_p K} \cos \varphi \cdot \frac{dM}{d\theta} \quad (6.15)$$

Mengambil rasio dari daya sebenarnya diindikasikan pada pembacaan wattmeter actual, didapat

$$\frac{\text{daya sebenarnya}}{\text{nilai yang terbaca wattmeter}} = \frac{\theta}{\theta'}$$

$$= \frac{\frac{VI}{R_p K} \cos \varphi \cdot \frac{dM}{d\theta}}{\frac{VI}{R_p K} \cos \alpha \cos(\varphi - \alpha) \cdot \frac{dM}{d\theta}} = \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha \cos(\varphi - \alpha)}$$

Sehingga koreksi faktor dapat diidentifikasi sebagai

$$\text{Arus eddy } I_e = \frac{E_c}{R_c} = \frac{BRbt\omega}{k\rho}$$

$$\text{Gaya redaman } F_D = B \times I_e \times d = \frac{B^2 R d b t \omega}{k\rho} \quad (N)$$

$$\text{Torsi redaman } T_D = F_D \times R = \frac{B^2 R^2 d b t \omega}{k\rho} \quad (Nm)$$

$$\text{Oleh karena itu, resistansi arus eddy } R_c = k \frac{\rho d}{bt}$$

$$\text{Konstanta redaman } K_D = \frac{T_D}{\omega} = \frac{B^2 R^2 d b t}{k\rho} \quad (N \cdot m / \text{rad } s^{-1})$$

### 3.4 PERMANEN MAGNET MOVING COIL INSTRUMENT

#### 3.4.1 Prinsip Operasi

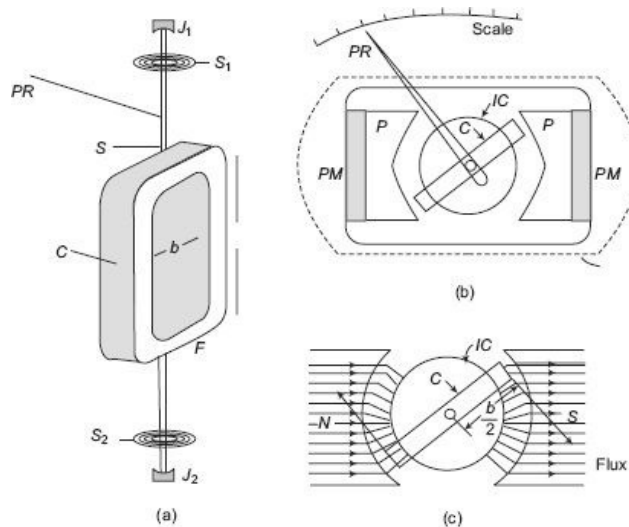
Prinsip kerja instrument *Permanent Magnet Moving Coil* (PMMC) adalah bahwa torsi diberikan pada kumparan pembawa arus yang ditempatkan di bidang magnet permanen. Instrumen PMMC ditunjukkan pada Gambar 3.11. Kumparan C memiliki sejumlah lilitan kawat berinsulasi tipis yang luka pada bekas aluminium persegi panjang F. Bingkai dibawa pada poros S yang dipasang di bantalan permata J1, J2. Sebuah pointer PR dipasang ke spindel sehingga bergerak di atas skala yang dikalibrasi. Seluruh sistem penggerak dibuat seringan mungkin untuk meminimalkan gesekan pada bantalan.

Kumparan bebas untuk berputar di celah udara yang terbentuk antara potongan tiang besi lunak berbentuk dari magnet permanen dan inti silinder besi lunak tetap [Gambar 3.11 (b)]. Inti melayani dua tujuan; (a) memperkuat medan magnet dengan mengurangi panjang celah udara, dan (b) membuat medan radial dan seragam

pada celah udara.

Dengan demikian, kumparan selalu bergerak pada sudut siku-siku terhadap medan magnet [Gambar 3.11 (c)]. Magnet permanen modern terbuat dari paduan baja yang sulit dibuat dengan mesin. Potongan tiang besi lunak dipasang ke magnet permanen untuk memudahkan pemesinan guna menyesuaikan panjang celah udara. Gambar 3.11 (d) menunjukkan bagian internal dan Gambar 3.11 (e) menunjukkan skema bagian internal instrumen kumparan bergerak.

Sebuah kuk besi lunak (Y) digunakan untuk melengkapi jalur fluks dan untuk memberikan pelindung dari medan luar yang menyimpang.



Gambar 3.11 Instrumen Permanent magnet moving coil (PMMC)

$I$  = arus yang terukur (rms)

$i_p$  = tegangan kumparan arus sesaat

$r_p$  = resistansi pada kumparan

$L$  = induktansi pada kumparan

$R_V$  = resistansi eksternal yang terhubung pada kumparan

$R_p$  = resistansi pada rangkaian kumparan

$Z_p$  = impedansi pada rangkaian kumparan

$M$  = induktansi diantara kumparan dan tekanan kumparan

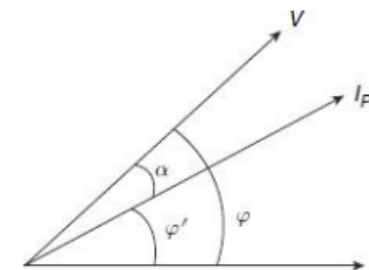
$\omega$  = frekuensi angular suplai ( $rad/s$ )

$\phi$  = perbedaan fase arus  $I$  dengan tegangan  $V$

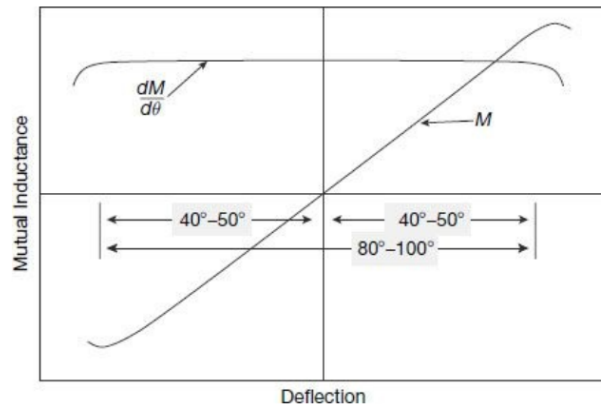
Karena induktansi yang permanen dari rangkaian kumparan tekanan, arus dan tegangan dalam kumpara tekanan tidak lagi sefase, melainkan arus yang melalui kumparan tekanan mendahului tegangan dengan sudut yang diberikan oleh:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R_p} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{r_p + R_V} \right)$$

Seperti yang dapat dilihat padagambar 7.13, arus yang melalui kumparan tekanan terlambat terhadap tegangandi atasnya oleh fase yang kurang dari diantara arus kumparan seat itu dan tekanan tegangan kumparan.



Gambar 6.13. diagram fasor wattmeter dengan induktansi tegangan kumparan.



Gambar 6.12. Variasi induktansi timbal balik dengan defleksi

Dengan desain yang cocok, induktansi antara kumparan dan bergerak dapat dibuat bervariasi secara linier dengan sudut defleksi pada rentang  $40^\circ$  hingga  $50^\circ$  di kedua sisi nol posisi induktansi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.12. Jika posisi nol saling menguntungkan, induktansi dapat disimpan pada skala menengah, maka skala yang dibagi-bagi untuk menjadi seragam lebih dari  $80^\circ$  hingga  $100^\circ$ , yang mencakup hampir seluruh rentang skala.

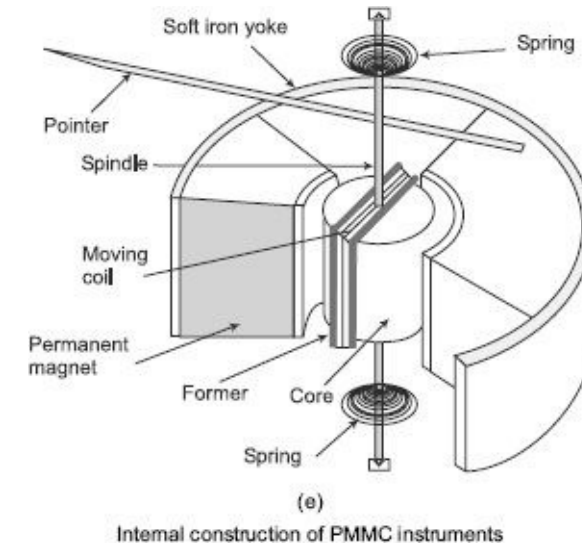
### 6.3.4 Error pada Elektrodinamometer Tipe Wattmeter

1. Error karena tekanan-induktansi kumparan

Sejauh ini rangkaian tekanan kumparan itu murni bersifat resistif. Pada kenyataannya, tekanan kumparan akan memiliki nilai induktansi bersamaan dengan resistansi. Hal ini akan mengenalkan error perhitungan kecuali pada hal tertentu yang dapat diatasi. Untuk memperkirakan error pengukuran, coba pahami ini:

$V$  = tegangan yang terukur (rms)

Foto dari komponen yang berbeda dari instrumen PMMC



### 3.4.2 Persamaan Torsi Defleksi Instrumen PMMC

Jika:

$B$  = kerapatan fluks dalam celah udara ( $\text{wb} / \text{m}^2$ )

$i$  = arus dalam kumparan (A)

$l$  = efektif panjang aksial dari kumparan (m)

$b$  = luasnya kumparan (m)

$n$  = jumlah lilitan kumparan.

Gaya di masing-masing sisi kumparan adalah

$$F = Bil \text{ (N)}$$

Torsi pada setiap sisi kumparan adalah:

$$T = F \times \frac{b}{2} = Biln \times \frac{b}{2}$$

Total torsi defleksi diberikan pada kumparan,

$$\begin{aligned} T_d &= 2 \times T = 2iln \times b/2 \\ &= Bilnb \text{ (N-m)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$T_d = 2 \times T = 2iln \times \frac{b}{2} = Bilnb \text{ (Nm)}$$

Untuk magnet permanen, B adalah konstan. Juga, untuk kumparan  $l$ ,  $b$  dan  $n$  adalah konstanta sehingga  $Blnb$  juga konstan.

Jika  $Blnb$  dianggap sebagai  $k_l$ , maka:

$$T_d = k_l \times i$$

#### 1. Torsi Kendali

Kontrol pada pergerakan penunjuk di atas skala disediakan oleh dua luka spiral, pegas fosfor-perunggu  $S_1$  dan  $S_2$ , satu di setiap ujung spindel S. Terkadang pegas ini juga mengalirkan arus masuk dan keluar dari kumparan. Torsi kontrol pegas sebanding dengan sudut  $\theta$  yang diputar oleh kumparan.

$$T_c = k_s \times \theta$$

di mana  $T_c$  adalah torsi kontrol dan  $k_s$  adalah konstanta pegas.

Pada posisi keadaan akhir yang stabil, torsi kendali = torsi defleksi.

$$T_c = T_d$$

$$\begin{aligned} \therefore \quad & T_c = T_d \\ & k_s \theta = k_l i \\ \text{or} \quad & \boxed{\theta = \frac{k_l}{k_s} i = ki} \\ \text{where } k &= \frac{k_l}{k_s} = \text{constant} \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\theta = \frac{VI \cos \phi}{KR_p} \frac{dM}{d\theta}$$

$$\theta = \left( K_1 \frac{dM}{d\theta} \right) P \quad (6.13)$$

Dimana, P adalah daya yang akan diukur, dan  $K_1 = \frac{1}{KR_p}$  adalah konstan. Defleksi keadaan stabil  $\theta$  sebagai indikasi daya P terukur.

### 6.3.3 Bentuk Skala pada Elektrodinamometer Tipe Wattmeter

Defleksi stabil dapat dibuat dengan daya P yang akan diukur, yaitu defleksi akan bervariasi secara linier dengan variasi daya jika laju perubahan induktansi konstan pada kisaran defleksi. Maksudnya skala pengukuran akan seragam jika induktansi antara kumparan tetap dan bergerak dengan variasi secara linier pada sudut defleksi. Variasi pada induktansi seperti itu dapat dicapai dengan desain instrumen yang cermat. Gambar 6.12 menunjukkan sifat yang diharapkan dari variasi induktansi antara kumparan tetap dan bergerak sehubungan dengan sudut defleksi.



$$= I_p I \{ \cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi) \} \frac{dM}{d\theta} \quad (6.10)$$

Kehadiran istilah  $(2\omega t)$  menunjukkan torsi sesaat seperti yang ditunjukkan pada persamaan (6.10)

Defleksi tegangan torsi satu putaran penuh yaitu

$$\begin{aligned} T_d &= \frac{1}{T} \int_0^T T_i d\omega t = \frac{1}{2\pi} \{ \cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi) \} \frac{dM}{d\theta} \\ &= \frac{I_p I}{2\pi} \sum_0^{2\pi} [\omega t \cos \varphi] \frac{dM}{d\theta} \\ &= I_p I \cos \varphi \frac{dM}{d\theta} \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{V}{R_p} I \cos \varphi \frac{dM}{d\theta} \\ &= \frac{VI \cos \varphi}{R_p} \frac{dM}{d\theta} \end{aligned} \quad (6.12)$$

Dengan konstanta pegas  $K$ , pengontrolan torsi disediakan dengan pegas untuk defleksi final (stabil) dari  $\theta$  yaitu

$$T_c = K\theta$$

Dalam kondisi stabil, rata-rata defleksi torsi akan seimbang dengan menontrol torsi yang ada pada pegas. Sehingga saat kondisi seimbang  $T_c = T_d$ .

$$\begin{aligned} T_c &= T_d \\ K\theta &= \frac{VI \cos \varphi}{R_p} \frac{dM}{d\theta} \end{aligned}$$

$$k_s \theta = k_1 i$$

Atau

$$\theta = \frac{k_1}{k_s} i = ki$$

Di mana  $k = \frac{k_1}{k_s}$  adalah konstan.

Jadi, defleksi sudut pointer berbanding lurus dengan arus. Dengan demikian, skala instrumen dibagi secara linier atau seragam.

## 2. Damping Torsi

Ketika aluminium bahan (F) bergerak dengan kumparan di bidang magnet permanen, tegangan diinduksi, menyebabkan arus eddy mengalir di dalamnya. Arus ini memberikan gaya pada yang pertama. Menurut hukum Lenz, kekuatan ini menentang gerakan yang memproduksinya. Dengan demikian, torsi redaman diperoleh. Redaman seperti ini disebut redaman arus-pusar.

### 3.4.3 Swamping Resistor

Kumparan instrumen terbuat dari tembaga. Ketahanannya bervariasi dengan suhu. Sebuah resistor koefisien suhu rendah, disebut resistor swamping, dihubungkan secara seri dengan kumparan. Ketahanannya praktis tetap konstan dengan suhu. Oleh karena itu pengaruh suhu pada resistansi koil dibanjiri oleh resistor ini.

### 3.4.4 Keuntungan dari PMMC Instrumen

1. Sensitif untuk saat ini kecil
2. Sangat akurat dan handal
3. Skala seragam hingga  $270^\circ$  atau lebih
4. Sangat efektif dibuat redaman
5. Konsumsi daya yang rendah, bervariasi dari  $25 \mu\text{W}$  ke  $200 \mu\text{W}$
6. Bebas dari hysteresis dan tidak dipengaruhi oleh medan eksternal karena perisai magnet permanen kumparan dari medan magnet eksternal
7. Mudah diadopsi sebagai instrumen multi-range

### 3.4.5 Kekurangan dari PMMC Instrumen

1. Jenis instrumen ini hanya dapat dioperasikan dalam arus searah. Pada arus bolak-balik, instrumen tidak beroperasi karena pada separuh positif, penunjuk mengalami gaya pada satu arah dan pada separuh negatif penunjuk mengalami gaya pada arah yang berlawanan. Karena inersia penunjuk, ia mempertahankan posisi nolnya.
2. Sistem bergerak sangat halus dan mudah rusak oleh perlakuan yang kasar.
3. Kumparan menjadi sangat halus, tidak bisa menahan beban

Seperti yang sudah dijelaskan pada chapter 2, torsi sesaat pada elektrodinamometer tipe wattmeter ditunjukkan pada gambar 6.11. yaitu

$$T_i = i_p i_c \frac{dM}{d\theta} \quad (6.9)$$

Tegangan sesaat pada menyebrangi tekanan pada rangkaian kumparan

$$V_p = \sqrt{2} x V \sin \omega t$$

Jika resistansi kumparan diasumsikan sangat tinggi, kumparan tegangan keseluruhan dianggap sebagai resistansi. Arus  $i_p$  pada kumparan tegangan demikian dapat diasumsikan sefase dengan tegangan  $v_p$ , dan nilainya sesaat.

$$i_p = \frac{v_p}{R_p} = \sqrt{2} x \frac{V}{R_p} \sin \omega t = \sqrt{2} x I_p \sin \omega t$$

Dimana  $I_p = V/R_p$  adalah nilai arus rms pada kumparan.

Asumsikan jika resistansi kumparan cukup tinggi untuk mencegah percabangan dari setiap bagian arus suplai menuju kumparan tekanan, arus kumparan dapat ditulis sebagai

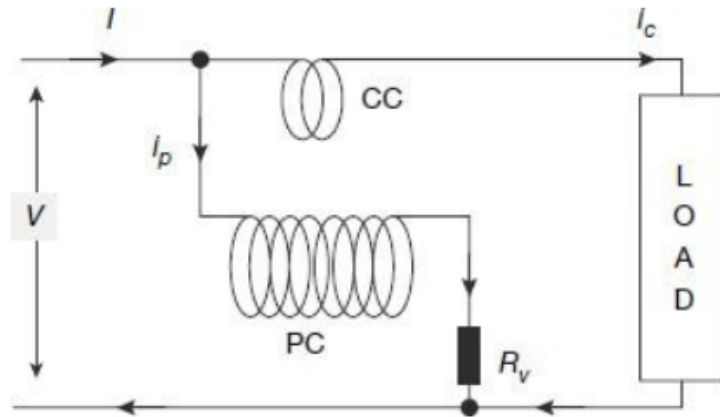
$$i_c = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi)$$

Sehingga torsi sesaat dari persamaan (6.9) dapat ditulis sebagai

$$\begin{aligned} T_i &= \sqrt{2} x I_p x \sin \omega t x \sqrt{2} x I \sin(\omega t - \varphi) \frac{dM}{d\theta} \\ &= 2 I_p I \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \frac{dM}{d\theta} \end{aligned}$$

### 6.3.2 Operasi Elektrodinamometer Tipe Wattmeter

Skematik rangkaian operasional dari elektrodinamometer tipe wattmeter yang digunakan untuk pengukuran daya pada rangkaian ditunjukkan pada gambar 6.11.



Gambar 6.11. Rangkaian operasional elektrodinamometer tipe wattmeter.

$V$  = tegangan yang terukur (rms)

$I$  = arus yang terukur (rms)

$i_p$  = tegangan kumparan arus sesaat

$i_c$  = arus kumparan arus sesaat

$R_v$  = resistansi eksternal yang terhubung pada kumparan

$R_p$  = resistansi rangkaian kumparan (resistansi  $PC + R_v$ )

$M$  = induktansi timbal balik antara kumparan

$\theta$  = sudut defleksi dari sistem yang bergerak

$\omega$  = frekuensi sudut pasokan ( $\frac{rad}{s}$ )

$\phi$  = sudut fase lag arus dengan tegangan

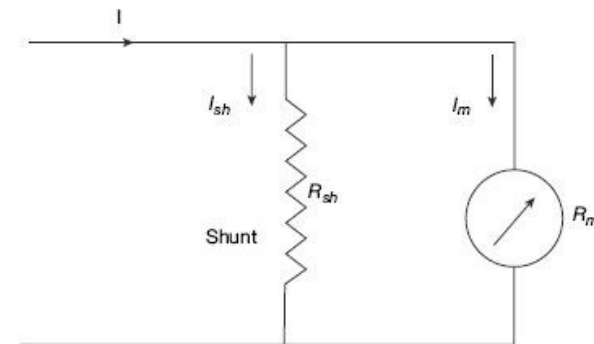
berlebih yang lama.

4. Lebih mahal.
5. Penuaan instrumen (magnet permanen dan pegas kontrol) dapat menyebabkan beberapa kesalahan.

### 3.5 JENIS INSTRUMEN

#### 3.5.1 Ammeter Shunts

Instrumen kumparan bergerak memiliki lilitan kumparan dengan kawat yang sangat halus. Itu hanya dapat membawa beberapa mA dengan aman untuk memberikan defleksi skala penuh. Untuk mengukur arus yang lebih tinggi, resistansi rendah dihubungkan secara paralel ke instrumen untuk melewati bagian utama arus. Hambatan rendah yang dihubungkan secara paralel dengan kumparan disebut shunt. Gambar 3.12 menunjukkan resistansi shunt  $R_{sh}$  yang dihubungkan secara paralel dengan meter dasar.



Gambar 3.12 PMMC ammeter menggunakan shunt

Hambatan dari shunt dapat dihitung menggunakan analisis sirkuit konvensional.

$R_{sh}$  = Hambatan shunt ( $\Omega$ )

$R_m$  = Resistensi koil ( $\Omega$ )

$I_m = I_f$  = defleksi skala penuh saat ini (A)

$I_{sh}$  = Shunt saat ini (A)

$I$  = arus yang akan diukur (A)

Penurunan tegangan melintasi shunt dan meteran harus sama karena mereka terhubung secara paralel.

$$I_{sh}R_{sh} = I_mR_m$$

$$I = I_{sh} + I_m$$

$$I_{sh} = I - I_m$$

Dari persamaan di atas maka,

$$R_{sh} = \frac{I_m}{I_{sh}} R_m$$

$$R_{sh} = \frac{I_m}{I - I_m} R_m$$

Perbandingan arus total dengan arus dalam meteran disebut daya perkalian shunt. Pengali daya:

$$m = \frac{I}{I_m} = 1 - \frac{R_m}{R_{sh}}$$

digunakan pada instrumen ini. Hal ini dikarenakan fakta bahwa ada elemen logam yang akan digunakan untuk meredam *Eddy-current* yang mengganggu dan mendistorsi medan magnet yang lemah. Apalagi ada magnet permanen yang bukan dari instrumen pengukuran ini dengan tujuan meredam *Eddy-current* akan menghambat pengoperasian medan magnet.

#### 5. Sistem Pelindung

operasi yang diproduksi oleh kumparan tetap, relative rendah pada instrumen tipe elektrodinamometer dibandingkan dengan jenis instrumen lainnya. Dalam beberapa kasus, bahkan medan magnet bumi dapat mengganggu pembacaan pengukuran. Dengan demikian sangat penting untuk menjauhkan instrumen tipe elektrodinamometer dari faktor eksternal medan magnet. Karena itu penutup instrumen semacam ini terbuat dari logam dengan permeabilitas tinggi untuk membatasi penetrasi medan magnet eksternal ke dalam instrumen.

dan juga untuk memastikan bahwa arus kumparan tegangan sefase dengan tegangan beban. Kumparan bergerak ini terbuat dari kabel halus yang dilutkan sebagai kumparan berinti. Bahan metal dapat menginduksikan *Eddy-current* dalam medan alternative.

3. Sistem gerakan dan pemulihan

Kumparan bergerak dengan pointer dilapisi aluminium *spindle* pada *case jewel bearings* yang digunakan untuk membantu *spindle*. Untuk sensitivitas yang tinggi, pergerakan kumparan tersuspensi dari torsi dengan *metallic suspension* yang mana menuju ke kumparan. Pada konstruksi lain, kumparan mungkin tersuspensi oleh serat sutera bersamaan dengan pegas *spiral* yang membutuhkan torsi. Torsi dengan suspense atau pegas juga memiliki fungsi pemulihan torsi untuk mengembalikan pointer kembali ke posisi semula saat perhitungan telah selesai.

Arus kumparan bergerak harus dibatasi sekecil mungkin agar sesuai dengan persyaratan sistem bergerak. Arus menuju dan keluar dari kumparan bergerak melalui dua pegas spiral.

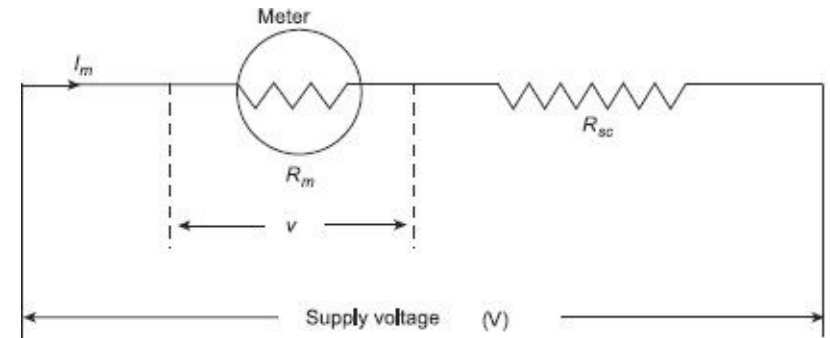
4. Sistem Redaman

*Damping* pada kebanyakan instrumen disediakan oleh baling-baling kecil yang terbuat dari aluminium di bawah *spindle*. Baling-baling ini dibuat unruk bergerak di dalam ruang tertutup, dengan menciptakan redaman torsi. Pada sisi lain, kumparan yang bergerak sendiri dapat menautkan pada selembaer mika yang tipis, yang bertindak sebagai baling-baling redaman saat bergerak. *Eddy-current* redaman tidak dapat

$$\text{Jadi } R_{sh} = \frac{R_m}{m-1}.$$

3.5.2 Voltmeter Multipliers

Untuk mengukur tegangan yang lebih tinggi, resistansi tinggi dihubungkan secara seri dengan instrumen untuk membatasi arus dalam kumparan ke nilai yang aman. Nilai arus ini tidak boleh melebihi arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan defleksi skala penuh. Hambatan tinggi yang dihubungkan secara seri dengan instrumen disebut pengali. Di Gambar 3.13,  $R_{sc}$  adalah pengali.



Gambar 3.13 PMMC voltmeter menggunakan multiplier

Nilai multiplier diperlukan untuk memperluas jangkauan tegangan, dihitung seperti di bawah:

$$R_{sc} = \text{resistansi multiplier } (\Omega)$$

$$R_m = \text{resistansi meter } (\Omega)$$

$$I_m = I_{fs} = \text{skala penuh defleksi saat ini (A)}$$

$$v = \text{tegangan meter untuk menghasilkan arus } I_m \text{ (A)}$$

V = tegangan yang akan diukur (A)

$$V = I_m R_m$$

$$V = I_m (R_m + R_{sc})$$

$$R_{sc} = V - \frac{I_m R_m}{I_m} = \frac{V}{I_m} - R_m$$

untuk multiplier

$$m = \frac{V}{v} = \frac{I_m (R_m + R_{sc})}{I_m R_m} = 1 + \frac{R_{sc}}{R_m}$$

$$R_{sc} = (m - 1) R_m$$

Instrumen kumparan bergerak adalah instrumen yang sangat sensitif. Oleh karena itu, banyak digunakan untuk mengukur arus dan tegangan. Koil instrumen mungkin memerlukan sejumlah kecil arus (dalam kisaran  $\mu\text{A}$ ) untuk defleksi skala penuh. Sensitivitas terkadang dinyatakan dalam ohm / volt. Sensitivitas voltmeter diberikan oleh

$$S = \frac{\text{Total voltmeter resistance in ohm}}{\text{Full scale reading in volts}} \Omega/v = \frac{R_m}{v} = \frac{1}{I_{fs}} \Omega/v$$

$$S = \frac{\text{total voltmeter resistance}(\Omega)}{\text{full scale reading (volt)}} = \frac{R_m}{v} = \frac{1}{I_{fs}} \Omega/v$$

di mana  $I_{fs}$  adalah arus defleksi skala penuh. Dengan demikian, sensitivitas bergantung pada arus untuk memberikan defleksi skala penuh.

Suatu instrumen memiliki dua kumpara yang berbeda arah ke satu rangkaian yang akan diukur dayanya. Kumparan tetap terhubung seri dengan beban, sehingga arus yang mengalir sama seperti arus yang mengalir di beban. Kumparan tetap bisa juga disebut sebagai *Current Coils* (CC) dari wattmeter. Medan magnetik utama dihasilkan oleh kumparan tetap. Kumparan ini dibagi menjadi dua bagian untuk menyediakan bentuk medan magnetik disekitar tengahnya dan untuk penepatan instrumen yang bergerak.

Kumparan tetap biasanya dililitkan kabel yang tebal untuk membawa arus beban utama. Gulungan kumparan biasanya terbuat dari konduktor terhubung ground.

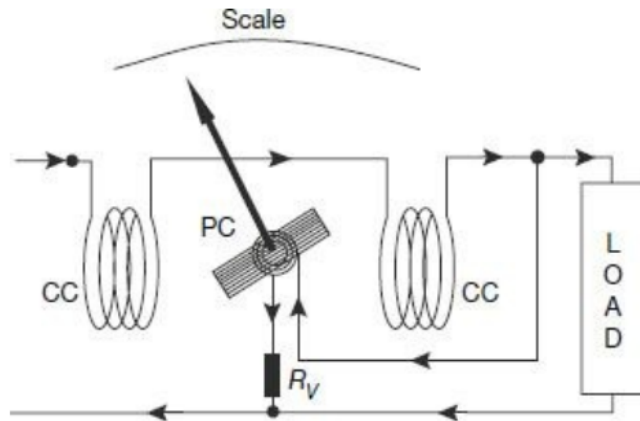
Kumparan tetap dipasang bantalan kaku dengan alasan untuk mencegah gerakan-gerakan yang menghasilkan distorsi. Bantalan yang baik terbuat dari keramik dan bukan bahan *metal*, agar tidak mengganggu pendistribusian medan magnetik.

## 2. Sistem kumparan bergerak.

Kumparan bergerak terhubung parallel dengan beban dan membawa arus proporsional yang sebanding dengan tegangan. Dikarenakan kumparan bergerak membawa arus yang proporsional ke tegangan, kumparan ini disebut juga sebagai kumparan tegangan atau *simpli PC* dari wattmeter. Kumparan bergerak ini sepenuhnya mencakup kumparan tetap. Nilai *non-inductive resistance* yang tinggi terhubung seri dengan tegangan kumparan untuk membatasi arus yang melaluinya,

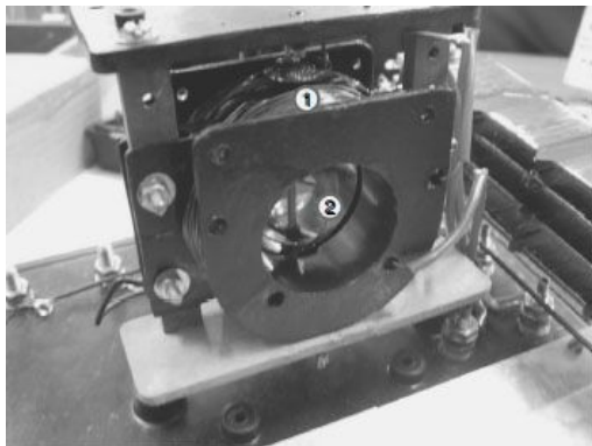
### 6.3.1 Konstruksi Elektrodinometer Tipe Wattmeter

Diagram skematik konstruksi dasar elektrodinometer tipe wattmeter ditunjukkan pada gambar 6.9



Gambar 6.9. Skematik elektrodinometer tipe wattmeter

Bentuk internal dari aransemen elektrodinometer ditunjukkan pada gambar 6.10

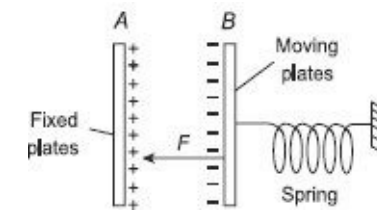


Gambar 6.10. Foto bentuk internal dari elektrodinometer tipe wattmeter: (1) kumparan tetap (2) kumparan bergerak.

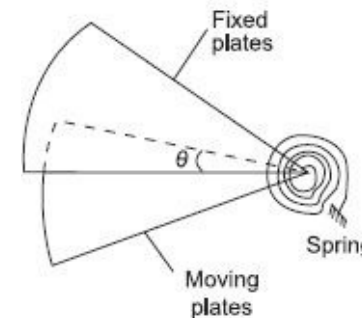
1. Sistem kumparan tetap

### 3.5.3 Instrumen Elektrostatis

Dalam instrumen elektrostatis, torsi defleksi dihasilkan oleh aksi medan listrik pada konduktor bermuatan. Instrumen semacam itu pada dasarnya adalah voltmeter, tetapi dapat digunakan dengan bantuan komponen eksternal untuk mengukur arus dan daya. Penggunaan terbesarnya di laboratorium adalah untuk pengukuran tegangan tinggi.



Gambar 3.20 gerak linier instrumen elektrostatis



Gambar 3.21 gerakan berputar instrumen elektrostatis

Ada dua cara gaya bekerja:

1. Satu jenis melibatkan dua elektroda bermuatan berlawanan. Salah satunya diperbaiki dan yang lainnya dapat dipindahkan. Karena gaya tarik, elektroda yang dapat digerakkan ditarik ke arah yang tetap.

2. Pada jenis yang lain, terdapat gaya tarik atau tolakan antara elektroda yang menyebabkan gerakan berputar pada elektroda yang bergerak.

Dalam kedua kasus, mekanismenya menyerupai kapasitor variabel dan gaya atau torsi disebabkan oleh fakta bahwa mekanisme tersebut cenderung menggerakkan elektroda yang bergerak ke posisi di mana energi yang disimpan adalah maksimum.

### 3.5.4 Instrumen Tipe Induksi

Instrumen tipe induksi hanya digunakan untuk pengukuran ac dan dapat digunakan baik sebagai ammeter, voltmeter atau wattmeter. Bagaimanapun, prinsip induksi menemukan penerapan terluasnya sebagai watt-hour atau pengukur energi. Dalam instrumen tersebut, torsi defleksi dihasilkan karena reaksi antara fluks magnet ac dan arus eddy yang diinduksi oleh fluks lain.

### 3.5.5 Instrumen Electrothermal

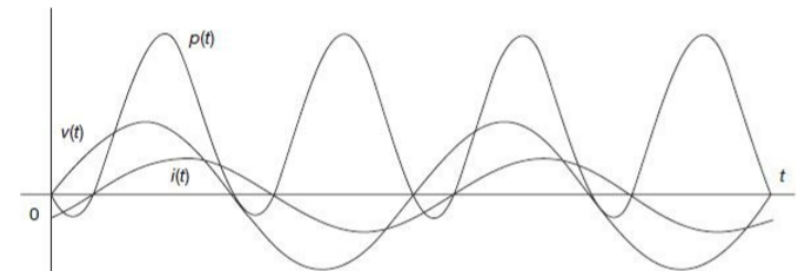
Ada dua jenis instrumen termal:

1. jenis hot-wire
2. instrumen thermocouple

Gerakan hot-wire dan thermocouple meter menggunakan efek pemanasan dari arus yang mengalir melalui resistansi untuk menyebabkan defleksi meter. Masing-masing menggunakan efek ini dengan cara yang berbeda. Karena operasinya hanya bergantung pada efek pemanasan aliran arus, mereka dapat digunakan untuk mengukur arus searah dan bolak-balik dari frekuensi apa pun pada skala tunggal.

diukur hanya dengan menghubungkan sepasang ammeter dan voltmeter. Wattmeter, dengan fasilitas bawaan untuk memperhitungkan faktor daya, hanya dapat digunakan untuk pengukuran daya pada rangkaian ac.

Gambar 6.8 memplot bentuk gelombang dari daya sesaat  $p(t)$ , tegangan  $v(t)$ , dan arus  $i(t)$ .



Gambar 6.8 Plot bentuk gelombang dari tegangan dan daya sesaat pada rangkaian ac

Pembaca mungkin menemukan hal yang menarik untuk diperhatikan pada Gambar 6.8 bahwa meskipun tegangan dan bentuk gelombang saat ini memiliki nilai rata-rata nol selama siklus lengkap, daya seketika telah mengimbangi di atas nol yang memiliki nilai rata-rata tidak nol.

## 6.3 Wattmeter Tipe Electrodynamometer

Wattmeter tipe elektrodinamometer memiliki konstruksi dan desain yang mirip dengan elektrodinamometer analog untuk mengukur arus listrik (ammeter) dan tegangan (voltmeter)



di mana,  $V_m$  dan  $I_m$  adalah nilai puncak tegangan dan arus masing-masing, dan  $w$  adalah frekuensi sudut.

$$p(t) = V_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \quad (6.7)$$

atau,

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$$

Nilai rata-rata daya atas siklus lengkap dalam kasus seperti itu akan menjadi

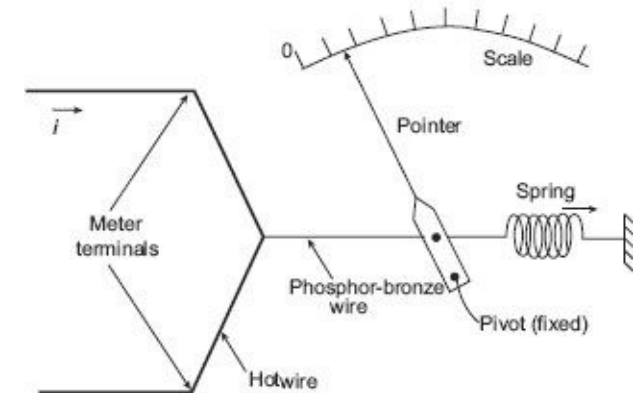
$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2T} \int_0^{2T} p(t) dt = \frac{1}{2T} \int_0^{2T} \frac{V_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] dt \\ &= \frac{V_m I_m}{2T} \int_0^{2T} \left[ \cos \varphi - \left( \cos \frac{4\pi}{T} t - \varphi \right) \right] dt \\ &= \frac{V_m I_m}{2T} \left[ \cos \varphi t \Big|_0^T - \frac{T}{4\pi} \sin \frac{4\pi}{T} t - \varphi \Big|_0^T \right] \\ &= \frac{V_m I_m}{4T} [\cos \varphi T - 0] \\ &= \frac{V_m I_m}{2} \cos \varphi \\ &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos \varphi \\ &= V I \cos \varphi \end{aligned} \quad (6.8)$$

dimana,  $V$  dan  $I$  adalah nilai rms dari tegangan dan arus masing-masing dan  $\cos j$  adalah faktor daya dari beban.

Keterlibatan istilah faktor daya  $\cos j$  dalam ekspresi untuk daya dalam rangkaian ac menunjukkan bahwa daya ac tidak dapat

### 3.5.6 Instrumen Hot-Wire

Defleksi gerakan meteran kawat panas bergantung pada ekspansi kawat resistansi tinggi yang disebabkan oleh efek pemanasan dari kawat itu sendiri saat arus mengalir melaluinya. Sebuah kawat resistan direntangkan di antara terminal dua meter, dengan sebuah benang dipasang pada sudut kanan ke tengah kabel. Pegas yang terhubung ke ujung benang memberikan tegangan konstan pada kabel resistan. Aliran arus memanaskan kabel, menyebabkannya mengembang. Gerakan ini ditransfer ke penunjuk meter melalui utas dan poros. Gambar 3.23 menunjukkan susunan dasar dari instrumen tipe kawat panas.



**Gambar 3.23** Instrumen Hot-wire

Keuntungan dari instrumen hot-wire adalah:

1. Defleksi hanya bergantung pada nilai rms dari arus yang mengalir melalui kabel, terlepas dari bentuk gelombang dan frekuensinya. Karenanya, instrumen dapat digunakan

untuk sistem ac dan juga dc.

2. Kalibrasi sama untuk pengukuran ac dan juga dc. Jadi ini adalah instrumen tipe transfer.
3. Instrumen bebas dari medan magnet yang menyimpang karena tidak ada medan magnet yang digunakan untuk menyebabkan operasi mereka.
4. Biayanya murah dan sederhana dalam konstruksi.
5. Dengan penyetelan yang sesuai, kesalahan karena variasi suhu dapat diabaikan.
6. Jenis instrumen ini cukup cocok untuk pengukuran frekuensi sangat tinggi.

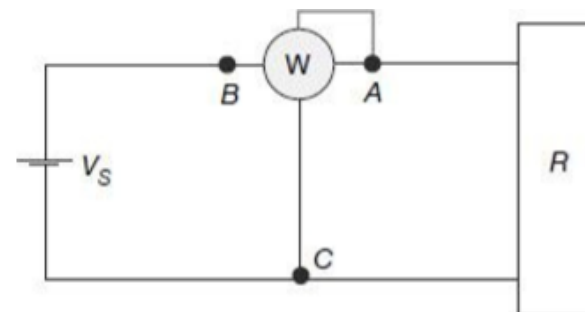
Kekurangan instrumen hot-wire adalah:

1. Konsumsi daya yang relatif tinggi.
2. Skala tidak seragam.
3. Ini sangat lamban dalam tindakan karena waktu yang dibutuhkan untuk memanaskan kawat.
4. Defleksi instrumen tidak sama untuk nilai naik dan turun.
5. Pembacaan tergantung pada suhu atmosfer.

### 3.5.7 Instrumen Thermocouple

Ketika dua logam yang memiliki fungsi kerja berbeda

kesalahan saat ini dapat dihindari, tetapi sekarang kumparan tegangan mengukur penurunan tegangan surplus di seluruh kumparan arus.



Gambar 6.7 Koneksi wattmeter tipe dinamometer untuk pengukuran daya pada rangkaian dc

## 6.2 Pengukuran Daya Dalam Rangkaian AC

Dalam rangkaian arus bolak-balik, daya sesaat bervariasi secara terus-menerus karena tegangan dan arus bervariasi saat melalui siklus. Dalam kasus seperti itu, kekuatan kapan saja diberikan.

$$p(t) = v(t) \times i(t) \quad (6.6)$$

di mana,  $p(t)$ ,  $v(t)$ , dan  $i(t)$  adalah nilai daya sesaat, tegangan, dan arus masing-masing.

Jadi, jika tegangan dan arus dapat diasumsikan sebagai sinusoidal, dengan arus yang tertinggal tegangan oleh fase-sudut  $\phi$ , maka

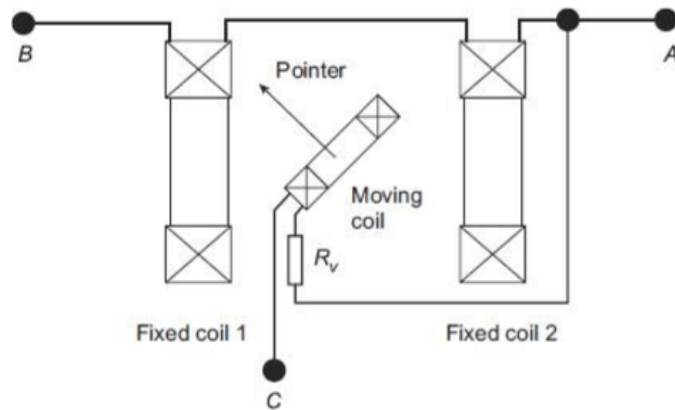
$$v(t) = V_m \sin \omega t$$

dan

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

Kumparan tetap, umumnya disebut sebagai kumparan arus, membawa arus beban sementara kumparan bergerak, umumnya disebut sebagai kumparan tegangan, membawa arus yang proporsional, melalui resistor pengali  $R_V$ , ke tegangan melintasi resistor beban. akibatnya, defleksi kumparan bergerak sebanding dengan daya yang dikonsumsi oleh beban.

Koneksi pada tipe ini seperti wattmeter untuk pengukuran daya di sirkuit dc yang ditunjukkan pada Gambar 6.6.

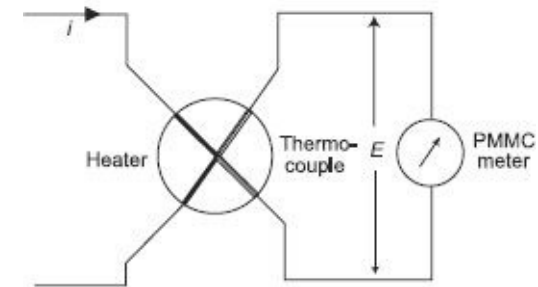


Gambar 6.6 Konstruksi dasar wattmeter tipe dinamometer

Dalam hubungan wattmeter yang demikian, kesalahan penyisipan, seperti dalam kasus sebelumnya dengan ammeter dan voltmeter, masih ada. Penentuan posisi  $\beta$  relatif dari kumparan arus dan kumparan tegangan berkenaan dengan beban, memperkenalkan kesalahan  $V_S$  serupa dalam pengukuran daya aktual. Secara khusus, dengan menghubungkan koil tegangan antara A dan C (Gambar 6.7), kumparan arus membawa kelebihan arus yang mengalir melalui kumparan tegangan. Di sisi lain, dengan menghubungkan kumparan bergerak antara B dan C,

ditempatkan bersama-sama, tegangan dihasilkan di persimpangan yang hampir sebanding dengan suhu persimpangan. Persimpangan ini disebut termokopel. Prinsip ini digunakan untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik di persimpangan dua konduktor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.24.

Panas di persimpangan dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir di elemen pemanas sementara termokopel menghasilkan ggl di terminal keluarannya, yang dapat diukur dengan bantuan meteran PMMC. Ggl yang dihasilkan sebanding dengan suhu dan karenanya ke nilai rms arus. Oleh karena itu, skala instrumen PMMC dapat dikalibrasi untuk membaca arus yang melewati pemanas. Jenis instrumen termokopel dapat digunakan untuk aplikasi ac dan dc. Fitur yang paling efektif dari instrumen termokopel adalah dapat digunakan untuk mengukur arus dan tegangan pada frekuensi yang sangat tinggi. Nyatanya, instrumen ini sangat akurat jauh di atas frekuensi 50 MHz.



Gambar 3.24 Diagram sirkuit instrumen termokopel

Keuntungan dari instrumen tipe thermocouple

1. Ini tidak terpengaruh oleh medan magnet yang menyimpang.
2. Mereka memiliki kepekaan yang sangat tinggi.
3. Indikasi instrumen ini secara praktis tidak terpengaruh oleh frekuensi dan bentuk gelombang besaran pengukuran. Karenanya instrumen ini dapat digunakan untuk pengukuran arus hingga frekuensi 50 MHz dan memberikan akurasi setinggi 1%.
4. Instrumen ini sangat berguna sebagai instrumen transfer untuk kalibrasi instrumen dc dengan potensiometer dan sel standar.

Kekurangan instrumen tipe thermocouple

1. Kehilangan daya yang cukup besar karena efisiensi konversi termal yang buruk.
2. Akurasi pengukuran dan sensitivitas yang rendah terhadap beban berlebih, karena pemanas beroperasi pada suhu yang mendekati nilai batas. Dengan demikian, kapasitas berlebih dari instrumen tersebut kira-kira 1,5 kali dari arus skala penuh.
3. Multi-voltmeter yang digunakan dengan elemen termo harus lebih sensitif dan halus daripada yang digunakan dengan shunt, dan oleh karena itu, membutuhkan penanganan yang hati-hati.

### 3.5.8 Instrumen Tipe Rectifier

Susunan dasar dari instrumen jenis penyearah menggunakan rangkaian penyearah gelombang penuh ditunjukkan pada Gambar 3.25. Jika alat ini digunakan untuk mengukur besaran ac maka pertama sinyal ac diubah menjadi dc dengan bantuan penyearah.

$$V_R \times I_R = 79.96 \times 0.9995 = 79.92 \text{ W}$$

Konsumsi daya seperti yang ditunjukkan oleh dua meter  
 = Pembacaan voltmeter  $\times$  Pembacaan ammeter  
 =  $80 \times 0.9995 = 79.96 \text{ W}$

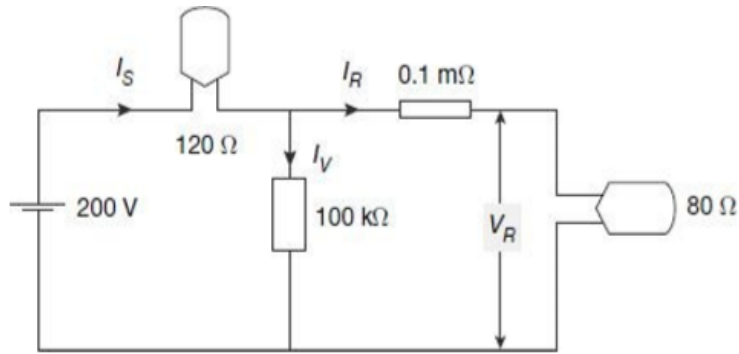
Dengan demikian, kita dapat memiliki analisis berikut:

Kasus	Konsumsi Daya oleh lampu 80 W (W)			% Kesalahan dari ideal
	Daya Ideal	Daya Aktual	Indikasi Meter	
a	80	79.922	79.986	0.0175
b	80	79.92	79.96	0.05

Daya pada rangkaian dc juga dapat diukur dengan wattmeter. Wattmeter dapat memberikan indikasi daya secara langsung dan tidak perlu melipatgandakan bacaan seperti dalam kasus ketika ammeter dan voltmeter digunakan.

Jenis wattmeter yang paling umum digunakan untuk pengukuran daya tersebut adalah dinamometer. Itu dibangun oleh (1) dua gulungan tetap, terhubung secara seri dan diposisikan secara koaksial dengan ruang di antara mereka, dan (2) gulungan bergerak, ditempatkan di antara gulungan tetap dan dilengkapi dengan pointer. Konstruksi semacam itu untuk wattmeter tipe dinamometer ditunjukkan pada Gambar 6.6.

Dapat ditunjukkan bahwa torsi yang dihasilkan dalam dinamometer sebanding dengan produk arus yang mengalir melalui kumparan tetap dikalikan dengan kumparan bergerak.



Gambar 6.5 Rangkaian Setara untuk Contoh 6.1 (a)

Arus suplai

$I_S = \text{Tegangan suplai} / \text{Resistansi ekivalen dari rangkaian}$

$$= \frac{\text{Tegangan suplai}}{\text{Seri lampu 1 dan paralel voltmeter dan [Paralel voltmeter dan (Seri ammeter dan lampu 2)]}}$$

$$= 200 / \left( 120 + \frac{[100 \times 10^3 \times (80 + 0.1 \times 10^{-3})]}{100 \times 10^3 + (80 + 0.1 \times 10^{-3})} \right)$$

$$= 1.003 \text{ A}$$

Arus melalui lampu 80 Ω (pembacaan ammeter) adalah

$$I_R = 1.0003 \times \frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3 + (80 + 0.1 \times 10^{-3})} = 0.9995 \text{ A}$$

Tegangan melintasi lampu 80 Ω

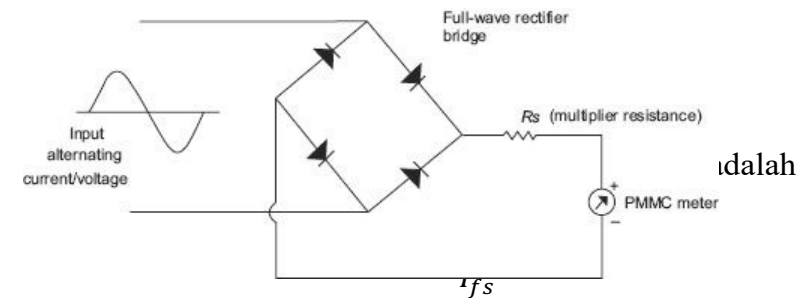
$$= I_R \times 80 = 79.96 \text{ V}$$

Membaca voltmeter

$$= I_V \times 100 \times 10^3 = (I_S - I_R) \times 100 \times 10^3 = 80 \text{ V}$$

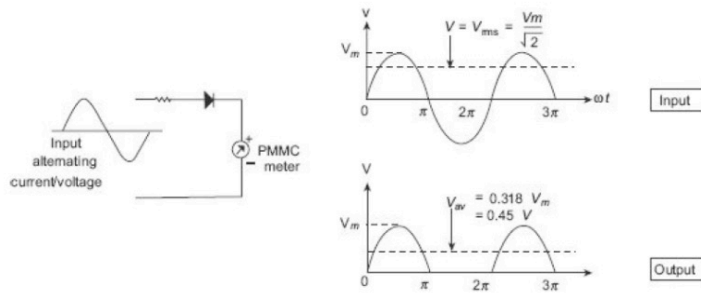
Dengan demikian, daya actual yang dikonsumsi oleh lampu 80 Ω adalah

Kemudian sinyal dc ini diukur dengan meter PMMC. Resistensi pengali  $R_s$ , digunakan untuk membatasi nilai arus agar tidak melebihi nilai arus meter PMMC. Jenis instrumen ini digunakan untuk pekerjaan arus ringan di mana tegangan rendah dan resistansi tinggi.



di mana  $I_{fs}$  adalah arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan defleksi skala penuh. Gambar 3.26 menunjukkan rangkaian penyearah setengah gelombang sederhana bersama dengan bentuk gelombang input dan output. Nilai rata-rata tegangan / arus untuk penyearah setengah gelombang,

$$V_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{V_m}{\pi} = 0,318V_m = 0,45V$$



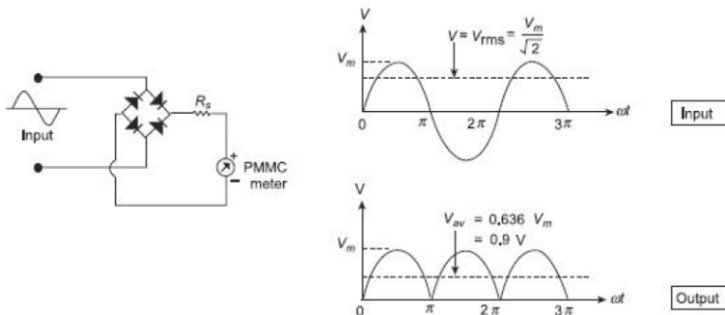
Gambar 3.26 Rectifier setengah gelombang

Oleh karena itu, sensitivitas instrumen penyearah setengah gelombang dengan ac adalah 0,45 kali kepekaannya dengan dc dan defleksinya 0,45 kali yang dihasilkan dengan dc sama besarnya dengan  $V$ .

$$S_{ac} = 0,45S_{dc}$$

Gambar 3.27 menunjukkan rangkaian penyearah gelombang penuh bersama dengan bentuk gelombang input dan output. Nilai rata-rata tegangan / arus untuk penyearah gelombang penuh,

$$V_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2V_m}{\pi} = 0,636V_m = 0,9V$$



Arus sebenarnya melalui  $80 \Omega$

$$I_R = 1.0003 \times \frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3 + 80} \text{ A} = 0.9995 \text{ A}$$

Tegangan melintasi lampu  $80 \Omega$  (pembacaan tegangan) adalah

$$V_R = I_R \times 80 = 79.962 \text{ V}$$

Dengan demikian, daya actual yang dikonsumsi oleh lampu  $80 \Omega$  adalah

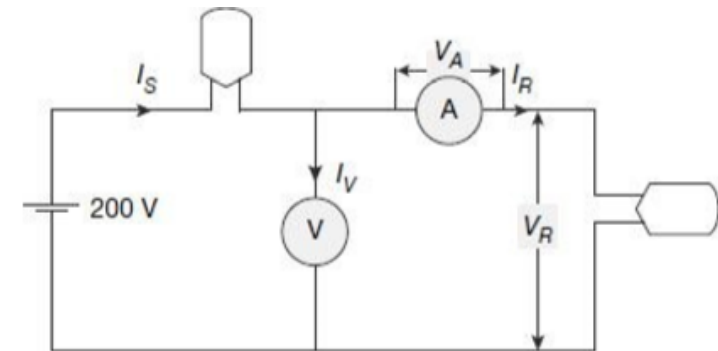
$$V_R \times I_R = 79.962 \times 0.9995 = 79.922 \text{ W}$$

Konsumsi daya seperti yang ditunjukkan oleh dua meter

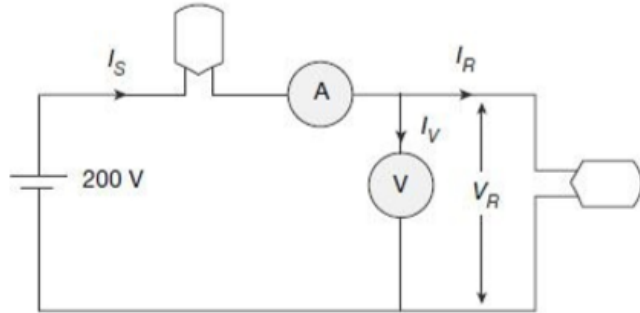
$$= \text{Pembacaan voltmeter} \times \text{Pembacaan ammeter}$$

$$= 79.962 \times 1.0003 = 79.986 \text{ W}$$

(b) dalam hal ini, rangkaian sebenarnya dan yang setara akan terlihat seperti Gambar 6.4.



Gambar 6.4 Koneksi sebenarnya untuk Contoh 6.1 (b)

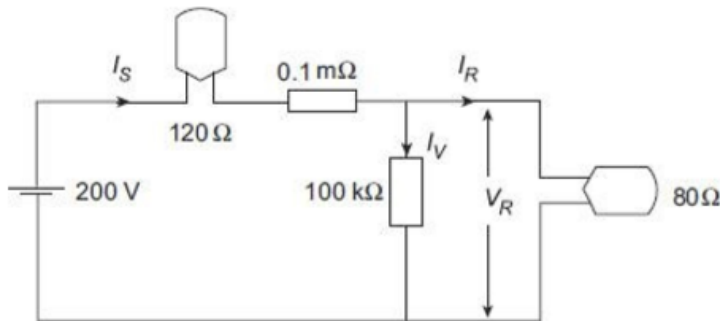


Gambar 6.2 Koneksi sebenarnya untuk Contoh 6.1 (a)

Karenanya, daya sebenarnya yang terpakai oleh lampu  $80 \Omega$  seharusnya

$$= 12 \times 80 = 80 \text{ W}$$

Namun, mengingat resistansi internal ammeter dan voltmeter, rangkaian ekuivalen akan terlihat seperti Gambar 6.3.



Gambar 6.3 Rangkaian Setara untuk Contoh 6.1 (a)

Arus suplai (pembacaan ammeter)

$$I_S = \frac{\text{Tegangan suplai}}{\text{Resistansi ekuivalen dari rangkaian}}$$

$$= \frac{\text{Tegangan suplai}}{(\text{Seri lampu 1 dan ammeter}) + (\text{Paralel lampu 2 dan voltmeter})}$$

$$= 200 / \left( (120 + 0.1 \times 10^3) + \frac{(100 \times 10^3 \times 80)}{(100 \times 10^3 + 80)} \right)$$

$$= 1.0003 \text{ A}$$

Gambar 2.27 Rectifier gelombang penuh

Jadi defleksi adalah 0,9 kali dalam instrumen penyearah gelombang penuh dengan ac daripada yang dihasilkan dengan dc yang sama besarnya  $V$ . Sensitivitas instrumen penyearah gelombang penuh dengan ac adalah 0,9 kali kepekaannya dengan dc.

$$S_{ac} = 0,9S_{dc}$$

## KESIMPULAN

1. Perangkat analog adalah perangkat di mana output atau tampilan merupakan fungsi waktu yang berkesinambungan dan memiliki hubungan yang konstan dengan inputnya.
2. Instrumen pengukuran diklasifikasikan menurut 2 hal, yakni kuantitas diukur dengan instrumen dan prinsip operasi.
3. Tiga prinsip-prinsip operasi tersedia:
  - a. Elektromagnetik, yang memanfaatkan magnet efek dari arus listrik;
  - b. Elektrostatik, yang memanfaatkan gaya antara listrik konduktor bermuatan;
  - c. Elektro-termal, yang memanfaatkan efek pemanasan.
4. Konstruksi alat ukur analog meliputi system gerak, system pengendalian, dan system damping.
5. Prinsip Permanent Magnet Moving Coil (PMMC) instrumen beroperasi adalah bahwa torsi yang diberikan pada sebuah kumparan pembawa arus ditempatkan di bidang magnet permanen.

6. Jenis-jenis instrumen untuk pengukuran besaran listrik contohnya adalah ammeter shunt, voltmeter multipliers, instrument elektrostatis, instrument tipe induksi, instrument tipe elektrotermal, instrument hot-wire, instrument thermocouple, dan instrument tipe rectifier.

## LATIHAN SOAL

1. Jelaskan 3 prinsip operasi pada alat ukur analog!
2. Jelaskan perbandingan spring dan gravity control!
3. Apa kelebihan dan kekurangan dari Permanent Magnet Moving Coil (PMMC)!
4. Instrumen Moving Coil memiliki data berikut: jumlah putaran = 100, lebar kumparan = 50 mm, kedalaman kumparan = 30 mm, kerapatan fluks pada celah =  $0,1 \text{ Wb} / \text{m}^2$ . Hitung torsi membelokkan saat membawa arus 10 mA.
5. Koil dari voltmeter Moving Coil memiliki lebar  $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  dan memiliki 100 lilitan luka di atasnya. Pegas kontrol memberikan torsi  $0,25 \times 10^{-3} \text{ Nm}$  ketika defleksi adalah 50 divisi pada skala. Jika kerapatan fluks medan magnet di celah udara adalah  $1 \text{ Wb} / \text{m}^2$ , temukan resistansi yang harus dimasukkan secara seri dengan koil untuk menghasilkan 1 volt per divisi. Resistansi voltmeter adalah  $10.000 \Omega$ .

sebenarnya yang dikonsumsi oleh beban saja. Kesalahan pengukuran yang sesuai umumnya disebut sebagai kesalahan penyisipan.

Idealnya, secara teori, jika kita menganggap voltmeter memiliki impedansi internal tak terbatas dan ammeter memiliki impedansi internal nol, maka dari (6.3) dan (6.5) dapat diamati bahwa daya yang dikonsumsi oleh masing-masing instrumen turun ke nol. Dengan demikian, dalam kasus yang ideal, kedua pengaturan dapat memberikan indikasi yang benar dari daya yang dikonsumsi oleh beban. Dalam kondisi praktis, nilai kehilangan daya pada instrumen cukup kecil, jika tidak sepenuhnya nol, dibandingkan dengan daya beban, dan oleh karena itu, kesalahan yang diperkenalkan pada pengaturan ini kecil.

### Contoh 6.1

Dua lampu pijar dengan resistensi  $80 \Omega$  dan  $120 \Omega$  dihubungkan secara seri dengan sumber dc 200 V. Temukan kesalahan dalam pengukuran daya pada lampu  $80 \Omega$  menggunakan voltmeter dengan resistansi internal  $100 \text{ k}\Omega$  dan ammeter dengan resistansi internal  $0,1 \text{ m}\Omega$ , ketika (a) voltmeter terhubung lebih dekat ke lampu daripada ammeter, dan (b) ketika ammeter terhubung lebih dekat ke lampu daripada voltmeter

**Solusi** Dengan menganggap kedua instrumen ideal, yaitu voltmeter dengan impedansi internal tak terbatas dan ammeter dengan impedansi internal nol, arus melalui rangkaian seri seharusnya

$$= 200 / (80 + 120) = 1 \text{ A}$$



$$I_V = V_R/R_V \quad (6.2)$$

Dimana,  $R_V$  adalah resistensi internal voltmeter.

Daya yang terpakai oleh beban

$$\begin{aligned} &= V_R \times I_R = V_R \times (I_S - I_V) \\ &= V_R \times I_S - V_R \times I_V \\ &= V_R \times I_S - V_R \times I_V \\ &= V_R \times I_S - V_R^2/R_V \end{aligned} \quad (6.3)$$

= Daya ditunjukkan oleh instrumen – Hilangnya daya dalam voltmeter

Dengan demikian, Daya ditunjukkan = Daya yang dikonsumsi + Hilangnya daya dalam voltmeter

Dalam pengaturan Gambar 6.1 (b), voltmeter mengukur penurunan tegangan melintasi ammeter selain yang jatuh melintasi beban.

Tegangan jatuh melintasi ammeter =

$$V_A = I_R \times R_A \quad (6.4)$$

dimana,  $R_A$  adalah resistansi internal ammeter.

Daya yang terpakai oleh beban =

$$\begin{aligned} &= V_R \times I_R = (V_S - V_A) \times I_R \\ &= V_S \times I_R - V_A \times I_R \\ &= V_S \times I_R - I_R^2 \times R_A \end{aligned} \quad (6.5)$$

= Daya ditunjukkan oleh instrumen

– Hilangnya daya dalam ammeter

Dengan demikian, Daya ditunjukkan = Daya yang dikonsumsi + Hilangnya daya dalam voltmeter

Dengan demikian, kedua pengaturan menunjukkan daya tambahan yang diserap oleh instrumen selain menunjukkan daya

## BAB IV PENGUKURAN HAMBATAN

### 4.1. PENDAHULUAN

Resistor digunakan dalam banyak aplikasi dalam rangkaian listrik. Sifat resistansi memainkan peran penting dalam menentukan spesifikasi kinerja untuk berbagai elemen rangkaian termasuk kumparan, belitan, isolasi, dan lain sebagainya. Dalam beberapa kasus penting untuk mengetahui besarnya nilai resistansi yang akurat untuk dapat mengetahui karakteristik perilaku sistem/rangkaian. Oleh karena itu, pengukuran resistansi menjadi syarat penting yang harus dikuasai dalam melakukan analisis suatu rangkaian, mesin, transformator dan sistem lainnya. Terlepas dari hal tersebut, resistor digunakan sebagai standar untuk pengukuran resistansi lain yang tidak diketahui nilainya dan untuk penentuan nilai induktansi serta kapasitansi yang tidak diketahui. Dalam sudut pandang pengukuran, resistansi dapat dibedakan menjadi resistansi rendah (*low resistance*), resistansi sedang (*medium resistance*) dan resistansi tinggi (*high resistance*)

### 4.2. PENGUKURAN RESISTANSI SEDANG

Pengukuran resistansi sedang dapat menggunakan beberapa metode, antara lain metode ohmmeter, metode voltmeter-ammeter dan metode jembatan Wheatstone.

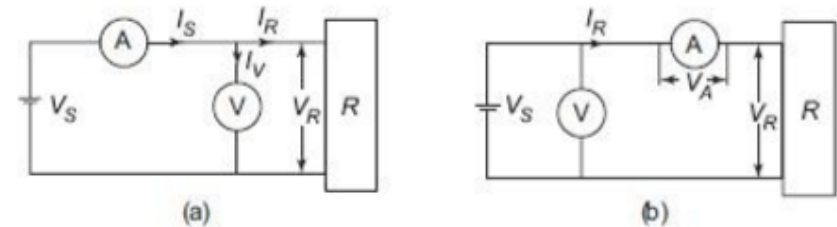
## BAB VI PENGUKURAN DAYA

### 6.1 Pengukuran Daya Dalam Rangkaian DC

Tenaga listrik ( $P$ ) yang terpakai oleh beban ( $R$ ) yang dipasok dari catu daya dc ( $V_S$ ) adalah produk dari tegangan yang melintasi beban ( $V_R$ ) dan arus yang mengalir melalui beban ( $I_R$ ):

$$P = V_R \times I_R \quad (6.1)$$

Dengan demikian, pengukuran daya dalam rangkaian dc dapat dilakukan menggunakan voltmeter ( $V$ ) dan ammeter ( $A$ ) menggunakan salah satu dari pengaturan yang ditunjukkan pada Gambar 6.1.



Gambar 6.1 Dua pengaturan untuk pengukuran daya dalam rangkaian dc

Satu hal yang harus diingat saat menggunakan salah satu dari dua pengaturan pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 6.1; bahwa voltmeter dan ammeter membutuhkan daya untuk operasi mereka sendiri. Dalam pengaturan Gambar 6.1 (a), voltmeter terhubung antara beban dan ammeter. Ammeter dengan demikian, dalam hal ini mengukur arus yang mengalir ke voltmeter, di samping arus yang mengalir ke beban.

Arus melalui voltmeter =

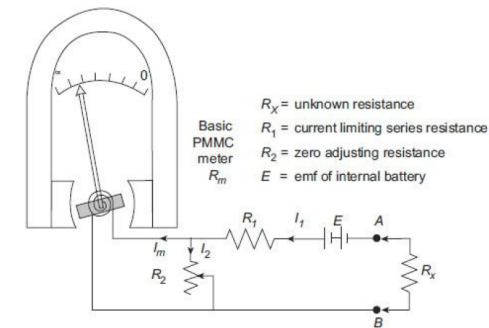
- Jembatan Wien dipakai untuk menentukan nilai frekuensi. Namun, metode ini dapat digunakan untuk aplikasi lainnya seperti perhitungan kapasitansi pada analisis distorsi harmonis yang menggunakan filter notch, dan juga pada audio dan HF osilator.

## LATIHAN

- Jelaskan dengan bantuan diagram fasor, bagaimana induktansi yang tidak diketahui dapat diukur menggunakan jembatan induktansi-kapasitansi Maxwell!
- Jelaskan mengapa jembatan induktansi-kapasitansi Maxwell cocok untuk pengukuran induktor yang memiliki faktor kualitas dalam kisaran 1 hingga 10!
- Jelaskan kelebihan dan kekurangan jembatan Maxwell untuk pengukuran induktansi tidak diketahui!
- Jelaskan bagaimana jembatan Wien dapat digunakan untuk pengukuran frekuensi yang tidak diketahui!
- Jelaskan cara kerja dari jembatan schering dalam pengukuran kapasitansi!

### 4.2.1. Metode Ohmmeter

Ohmmeter adalah alat pembacaan langsung yang praktis untuk pengukuran perkiraan nilai resistansi komponen rangkaian tanpa terlalu memperhatikan akurasi. Instrumen ini dapat memberikan pembacaan yang cepat dan langsung untuk nilai resistansi tanpa persyaratan penyesuaian yang tepat dari operator. Nilai resistansi yang tidak diketahui yang diukur pertama kali diperoleh hasilnya dari ohmmeter, dan ini dapat menghemat banyak waktu dalam penyeimbangan jembatan untuk mendapatkan nilai presisi akhir menggunakan metode jembatan.



Gambar 4.1. Ohmmeter seri rentang tunggal

Ohmmeter tipe seri terdiri dari komponen dasar berupa PMMC ammeter yang sensitive untuk pengukuran dc dan terhubung paralel dengan resistor/ *variable shunt* ( $R_2$ ). Rangkaian paralel dihubungkan secara seri dengan hambatan pembatas arus ( $R_1$ ) dan betarai ( $E$ ). Keseluruhan rangkaian dihubungkan pada terminal A dan B dengan resistansi  $R_x$  adalah resistor yang diukur.

Sebelum pembacaan dilakukan, terminal A dan B perlu dihubungkan bersamaan. Pada kondisi ini dengan  $R_x=0$ , arus yang

mengalir melalui alat ukur adalah maksimal. Resistansi shunt  $R_2$  diatur sehingga alat ukur dapat defleksi pada posisi defleksi skala penuh/ *full scale deflection* (FSD). Posisi pointer saat FSD disebut sebagai resistansi nol/ *zero resistance* (nilai  $0 \Omega$ ). Sebaliknya, saat terminal A dan B terbuka ( $R_x \rightarrow \infty$ ), maka tidak ada arus yang mengalir melalui alat ukur, sehingga pointer akan menunjuk pada posisi  $\infty$  sesuai Gambar 2.1. dengan kondisi tersebut alat ukur akan menunjukkan resistansi tak terhingga pada kondisi tidak ada arus dan resistansi nol saat kondisi FSD. Pada ohmmeter menunjukkan '0' pada posisi paling kanan dan ' $\infty$ ' pada posisi paling kiri yang berbeda dengan penunjukan pada ampermeter dan voltmeter.

Permasalahan pada ohmmeter ini adalah pada penggunaan baterai sebagai sumber tenaga karena kondisi baterai akan berubah secara perlahan berdasarkan penggunaan dan umur. Oleh karena itu resistor  $R_2$  digunakan untuk menyelesaikan efek tersebut dan memastikan posisi nol dapat diperoleh dengan mengaturnya. Pengaturan nol/ kalibrasi,  $R_x=0$ , dengan  $R_m$ =resistansi internal pada lilitan meter PMMC didapatkan rumus resistansi total (*equivalent resistance*)

$$R_{eq} = R_1 + \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m} \quad (4.1)$$

Sehingga didapatkan arus total

$$I_1 = \frac{E}{R_{eq}} = I_2 + I_m \quad (4.2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}}$$

Pada kebanyakan jembatan, parameter yang dipakai yaitu

$$R_1 = R_2 = R \text{ dan } C_1 = C_2 = C$$

Lalu, dari persamaan (5.37), didapat

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Jembatan Wien sensitive terhadap frekuensi. Jadi, akan sulit mendapat keseimbangan jika tidak menggunakan tegangan supply sinusoidal, karena jika tidak harmoni akan mengganggu kondisi keseimbangan. Penggunaan filter dengan detector nol dalam kasus tersebut dapat menyelesaikan masalah

## KESIMPULAN

1. Jembatan arus bolak-balik adalah instrumen yang paling populer, nyaman dan akurat untuk pengukuran induktansi yang tidak diketahui, kapasitansi dan beberapa kuantitas terkait lainnya.
2. Pengukuran induktansi dalam bisa menggunakan berbagai jembatan berikut : Jembatan Maxwell, Jembatan Maxwell Kapasitansi-Induktansi, Jembatan Hay, Jembatan Anderson, Jembatan Owen.
3. Pengukuran Kapasitansi bisa menggunakan jembatan De Sauty dan jembatan Schering

kapasitif  $I_C$ , yang mengalir secara parallel pada lengan  $R_1C_1$ , akan menambah total arus  $I_1$  pada lengan AB. Sehingga, penjumlahan fasor dari  $V_1$  dan  $V_3$  atau  $V_2$  dan  $V_4$  menghasilkan tegangan supply  $V$ .

Saat keadaan seimbang,

$$\frac{\left(\frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1}\right)}{R_3} = \frac{\left(R_2 - \frac{j}{\omega C_2}\right)}{R_4}$$

atau,

$$\frac{R_1 R_4}{1 + j\omega C_1 R_1} = \frac{\omega C_2 R_2 R_3 - j R_3}{\omega C_2}$$

atau,

$$\omega C_2 R_1 R_4 = \omega C_2 R_2 R_3 - j R_3 + j \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 R_3 + \omega C_1 R_1 R_3$$

atau,

$$\omega(C_2 R_1 R_4) =$$

$$\omega(C_2 R_2 R_3 + C_1 R_1 R_3) - j(R_3 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 R_3)$$

Penjumlahan bagian real dan imajiner, kita dapat

$$C_2 R_1 R_4 = C_2 R_2 R_3 + C_1 R_1 R_3$$

atau,

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} \quad (5.36)$$

dan

$$\omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 R_3 = R_3$$

atau,

Arus  $I_2$  dapat disesuaikan dengan mengatur nilai  $R_2$  sehingga arus  $I_m$  dapat dipertahankan pada nilai yang dikalibrasi ketika arus  $I_1$  berubah akibat drop tegangan pada baterai.

Penandaan skala maksimum, '0' dan ' $\infty$ ', pada ohmmeter tidak bergantung pada konstanta rangkaian. Namun, distribusi skala penandaan dalam rentang maksimum tersebut dipengaruhi oleh konstanta rangkaian. Oleh karena itu penting untuk merancang nilai konstanta rangkaian, khususnya  $R_1$  dan  $R_2$  untuk mendapatkan nilai kalibrasi yang tepat. Beberapa parameter yang perlu diketahui untuk menentukan nilai  $R_1$  dan  $R_2$  antara lain:

1. Arus meter ( $I_m$ ) pada skala FSD
2. Resistansi lilitan meter ( $R_m$ )
3. Tegangan baterai yang digunakan ohmmeter  $\epsilon$
4. Nilai resistansi yang tidak diketahui pada defleksi setengah-skala atau *half scale-deflection* ( $R_h$ ), yaitu nilai  $R_x$  ketika pointer menunjukkan setengah skala maksimum

Pada kondisi terminal A dan B terhubung, ketika  $R_x=0$ , arus maksimum akan mengalir dan arus yang mengalir keluar dari baterai adalah

$$I_{1MAX} = \frac{E}{R_i} \quad (4.3)$$

$$R_i = R_1 + \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m} \quad (4.4)$$

Pada *half-scale deflection*,  $R_x=R_h$ , dan  $I_h = \frac{I_{1MAX}}{2} = \frac{E}{R_i + R_h}$ ,

maka

$$I_h = \frac{E}{R_i + R_h} = \frac{E}{2R_i} \quad (4.5)$$

Atau,  $R_i = R_h$

$$I_h = \frac{E}{2R_h} \quad (4.6)$$

$$R_h = R_i = R_1 + \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m} \quad (4.7)$$

Pada kondisi FSD,  $I_h = I_{FSD}$

$$I_1 = 2I_h = 2 \times \frac{E}{2R_h} = \frac{E}{R_h} \quad (4.8)$$

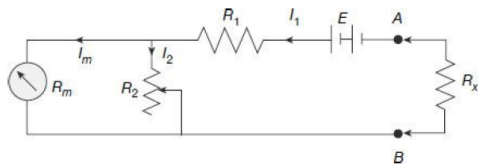
Sehingga  $I_m R_m = I_2 R_2$  dan  $I_2 = I_1 - I_m$ . Sehingga didapatkan

$$R_2 = \frac{I_{FSD} R_m R_h}{E - I_{FSD} R_h} \quad (4.9)$$

Dan sesuai persamaan 4.7 dan dengan memasukkan persamaan 4.9 maka didapatkan

$$R_1 = R_h - \frac{I_{FSD} R_m R_h}{E} \quad (4.10)$$

Rangkaian ekuivalen ohmmeter tipe seri dapat dilihat pada Gambar 4.2.

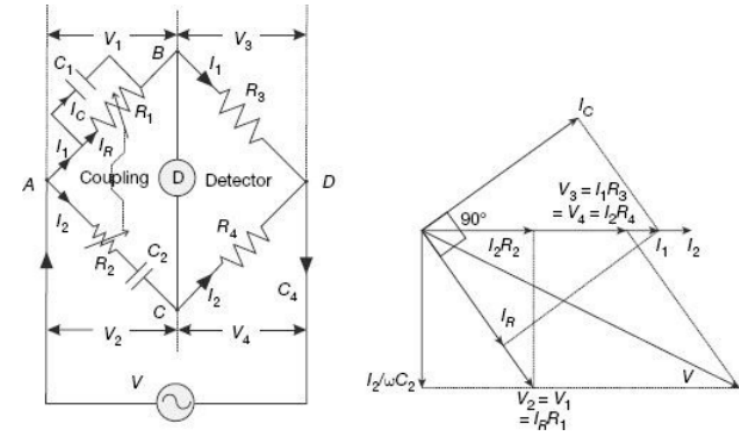


Gambar 4.2. Rangkaian ekuivalen ohmmeter tipe seri

Resistansi internal ohmmeter dapat ditulis

$$R_i = R_1 + \frac{R_2 R_m}{R_2 + R_m} \quad (4.11)$$

Maka



Gambar 5.13 Jembatan Wien dalam keadaan seimbang: (a) konfigurasi (b) diagram fasor

Jika dalam keadaan seimbang dan tidak ada arus listrik yang terdeteksi dalam rangkaian, node B dan C memiliki potensial yang sama, yaitu  $V_1 = V_2$  dan  $V_3 = V_4$ .

Seperti yang ditampilkan diagram fasor pada gambar 6.13 (b),  $V_3 = I_1 R_3$  dan  $V_4 = I_2 R_4$  memiliki nilai dan fase yang sama. Arus  $I_1$  pada lengan BD dan  $I_2$  yang mengalir melalui  $R_4$  juga sefase dengan  $I_1 R_3$  dan  $I_2 R_4$  dalam garis horizontal. Pada resistif drop lain  $I_2 R_2$ , pada lengan AC juga segaris horizontal. Tegangan resistif drop  $I_R R_2$  melintasi  $R_2$  dan *quadrature* kapasitif drop  $I_2 / \omega C_2$  melintasi  $R_2$  akan menambahkan total tegangan drop  $V_2$  pada lengan AC. Dalam keadaan seimbang, tegangan drop pada lengan AB dan AC sama, jadi  $V_1 = V_2$ . Tegangan  $V_1$  akan sefase dengan tegangan drop  $I_R R_1$  yang melintasi  $R_1$  pada lengan yang sama AB. Arus resistif  $I_R$  akan sefase dengan  $V_1 = I_R R_1$ . Penambahan fasor dari arus resistif  $I_R$  dan *quadrature* arus

Penjumlahan bagian real dan imajiner, kita dapat kuantitas:

$$r_1 = \frac{R_3 C_4}{C_2} \quad (5.33)$$

dan

$$C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3}$$

*Faktor Disipasi*

$$D_1 = \tan \delta_1 = \frac{I_1 r_1}{\frac{I_1}{\omega C_1}} = \omega C_1 r_1 = \omega x C_2 \frac{R_4}{R_3} x \frac{R_3 C_4}{C_2} = \omega R_4 C_4$$

Jadi, jika menggunakan metode Jembatan Schering, *factor disipasi* dapat didapatkan dengan jembatan dalam keadaan seimbang.

## 5.5 Pengukuran Frekuensi

Jembatan Wien dipakai untuk menentukan nilai frekuensi. Namun, metode ini dapat digunakan untuk aplikasi lainnya seperti perhitungan kapasitansi pada analisis distorsi harmonis yang menggunakan filter notch, dan juga pada audio dan HF osilator.

Konfigurasi dari Jembatan Wien untuk penentuan frekuensi dan korespondensi diagram fasor dalam keadaan seimbang ditampilkan pada gambar 5.13

$$I_1 = \frac{E}{R_i + R_x} \quad (4.12)$$

Arus pada meter ( $I_m$ )

$$I_m = I_1 \times \frac{R_2}{R_2 + R_m} = \frac{E}{R_i + R_x} \times \frac{R_2}{R_2 + R_m} \quad (4.13)$$

Pada kondisi terminal A dan B terhubung,  $R_x=0$ , maka dari 4.13 didapatkan

$$I_{FSD} = \frac{E}{R_i} \times \frac{R_2}{R_2 + R_m} \quad (4.14)$$

Dari persamaan 4.13 dan 4.14, meter dapat dihubungkan dengan FSD.

$$\frac{I_m}{I_{FSD}} = \frac{\frac{E}{R_i + R_x} \times \frac{R_2}{R_2 + R_m}}{\frac{E}{R_i} \times \frac{R_2}{R_2 + R_m}} = \frac{R_i}{R_i + R_x} \quad (4.15)$$

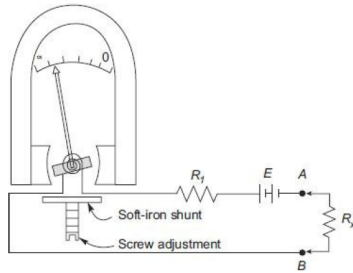
Maka didapatkan

$$I_m = \frac{R_i}{R_i + R_x} \times I_{FSD} \quad (4.16)$$

Fakta yang didapatkan dari persamaan 4.16 adalah bahwa arus meter dan skala dapat berubah dari nilai kalibrasi setiap kali resistor shunt  $R_2$  disesuaikan. Pada beberapa ohmmeter menggunakan besi lunak yang dapat disesuaikan ditempatkan di sepanjang potongan kutub meter seperti pada Gambar 4.3.

Besi lunak magnetik yang dipasang secara paralel yang diposisikan secara tepat dengan sekrup dapat memodifikasi celah udara magnet utama. Hal tersebut dapat mengendalikan sensitifitas gerakan. Pointer dapat diatur pada skala penuh secara tepat sebagai

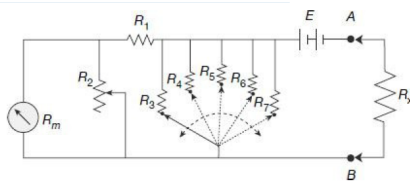
kompensasi perubahan GGL baterai tanpa melakukan perubahan rangkaian.



Gambar 4.3. ohmmeter seri dengan besi lunak

#### 4.2.1.1. Ohmmeter Seri Multirange

Untuk banyak tujuan praktis, sebuah ohmmeter perlu memiliki kemampuan untuk mengukur nilai resistansi pada berbagai rentang. Penggunaan skala tunggal dalam pengukuran tentu berpengaruh pada kenyamanan dan akurasi pembacaan alat ukur. Ohmmeter multirange seperti pada Gambar 4.4 dapat digunakan untuk mengukur resistansi pada rentang yang lebih tinggi. Resistor shunt tambahan,  $R_3$  sampai  $R_7$  digunakan untuk mengatur arus meter agar sesuai skala ‘0’ sampai ‘FSD’ ketika resistansi yang tidak diketahui ( $R_x$ ) diubah. Dalam ohmmeter multirange hambatan shunt diubah dengan memutar putaran pengaturan kisaran ohmmeter.



Gambar 4.4. Ohmmeter tipe multirange

$I_1$  pada lengan BD dan  $I_R$  mengalir melalui  $R_4$  yang juga sefase dengan  $I_1 R_3$  dan  $I_R R_4$  dalam garis horizontal. Pada resistifitas drop lainnya,  $I_1 R_1$  pada lengan AB juga dalam garis horizontal. Arus resistif  $I_R$  yang melalui  $R_4$  dan *quadrature* kapasitif arus  $I_C$  melalui  $C_4$  akan menambahkan total arus  $I_2$  pada lengan CD. Pindah ke lengan AB, resistif drop  $I_1 r_1$  dan *quadrature* kapasitif drop  $I_1/\omega C_1$  akan menambahkan total tegangan drop  $V_1$ . Saat keadaan seimbang, tegangan drop  $V_1$  diseluruh lengan AB akan sama dengan tegangan drop  $V_2 = I_2/\omega C_2$  pada lengan AC. Ini sesuai dengan diagram fasor yang tertera pada gambar 6.12 (b), dimana arus  $I_2$  mempunyai hubungan *quadrature* fase dengan tegangan kapasitif drop  $I_2/\omega C_2$  pada legan AC. Sehingga, penjumlahan fasor dari  $V_1$  dan  $V_3$  atau  $V_2$  dan  $V_4$  menghasilkan tegangan supply V.

Saat keadaan seimbang,

$$\frac{\left(r_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right)}{R_3} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_2}\right)}{\left(\frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}\right)}$$

atau,

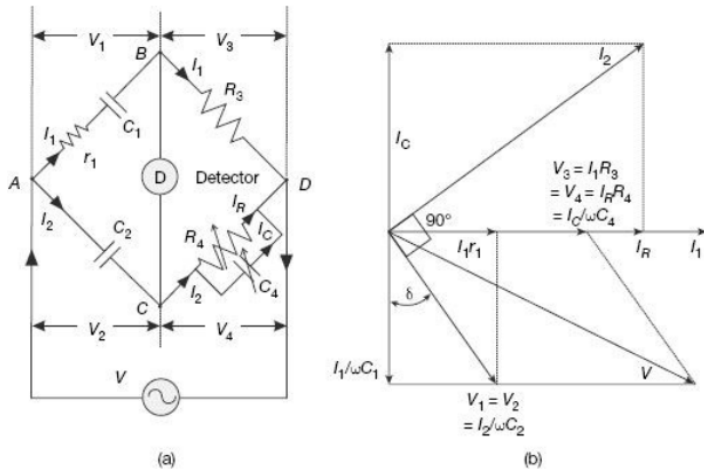
$$R_4 \left(r_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right) = \left(\frac{R_3}{j\omega C_2}\right) (1 + j\omega C_4 R_4)$$

atau,

$$R_4 r_1 - \frac{jR_4}{\omega C_1} = \frac{R_3 R_4 C_4}{C_2} - \frac{jR_3}{\omega C_2}$$



dari konfigurasi dan korespondensi diagram fasor dari Jembatan Schering dalam keadaan seimbang.



Gambar 5.12 Jembatan Schering dalam keadaan seimbang: (a) Konfigurasi (b) diagram fasor

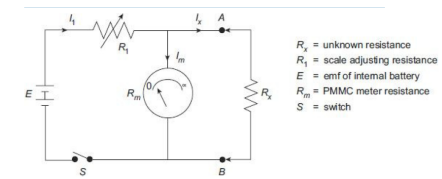
Kapasitor  $C_1$  yang tidak diketahui bersama resistansi internalnya terpasang pada lengan AB dibandingkan dengan standard *loss-less* kapasitor  $C_2$  yang terpasang pada lengan AC. Kapasitor  $C_2$  berada di antara udara atau gas kapasitor untuk membebaskan kerugian.  $R_3$  merupakan *non-inductive* resistansi yang terhubung pada lengan BD. Jembatan ini akan seimbang jika kita memvariasikan kapasitor  $C_4$  dan *non-inductive* resistor  $R_4$  yang dipasang secara paralel.

Jika dalam keadaan seimbang dan tidak ada arus listrik yang terdeteksi dalam rangkaian, node B dan C memiliki potensial yang sama, yaitu  $V_1 = V_2$  dan  $V_3 = V_4$ .

Seperti yang tertampil pada diagram fasor Gambar 5.12 (b),  $V_3 = I_1 R_3$  dan  $V_4 = I_R R_4$  memiliki nilai dan fase yang sama. Arus

#### 4.2.1.2. Ohmmeter Tipe Shunt

Ohmmeter tipe shunt terdiri dari baterai yang disusun secara seri dengan resistansi yang dapat disesuaikan ( $R_1$ ) dan dc sensitif yang mengukur ammeter PMMC. Resistansi yang tidak diketahui ( $R_x$ ) yang akan diukur dihubungkan di terminal A dan B serta paralel dengan meter. Gambar 4.5 menunjukkan ohmmeter tipe shunt.



Gambar 4.5. Ohmmeter tipe shunt

Ketika terminal A-B dihubungkan ( $R_x=0$ ), arus meter bernilai nol karena arus akan melewati terminal A-B yang dihubungkan singkat. Pada kondisi ini pointer akan menunjukkan angka '0Ω' pada skala ukur. Sebaliknya jika terminal A-B tidak dihubungkan ( $R_x \rightarrow \infty$ ) maka arus akan melalui meter. Dengan memilih nilai  $R_1$  yang sesuai, pointer akan menunjukkan nilai skala maksimum pada meter. Posisi ini ditunjukkan dengan symbol '∞Ω' pada skala meter.

Resistansi internal ohmmeter tipe shunt dapat dirumuskan dengan:

$$R_i = \frac{R_1 R_m}{R_1 + R_m} \quad (4.17)$$

Dengan terminal A-B terbuka, arus FSD yang melalui meter adalah:

$$I_{FSD} = \frac{E}{R_i + R_m} \quad (4.18)$$

Dengan  $R_x$  terhubung antara terminal A-B, arus yang keluar dari baterai

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + \frac{R_x R_m}{R_x + R_m}} \quad (4.19)$$

Maka arus meter adalah:

$$I_m = I_1 \times \frac{R_x R_m}{R_x + R_m} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_x R_m}{R_x + R_m}} \times \frac{R_x}{R_x + R_m} \quad (4.20)$$

Sehingga dari persamaan 4.18 dan 4.20 didapatkan

$$\frac{I_m}{I_{FSD}} = \frac{R_x}{R_x + R_i} \quad (4.21)$$

#### 4.2.2. Metode Voltmeter-Ampermeter

Metode voltmeter-ampermeter merupakan metode pengukuran resistansi secara langsung berdasarkan Hukum Ohm. Nilai resistansi yang diukur didapat dari pengukuran arus (I) yang mengalir melaluinya dan drop tegangan (V) yang melewatinya. Nilai resistansi didapat sesuai persamaan:

$$R_m = \frac{\text{Pembacaan voltmeter}}{\text{Pembacaan ampermeter}} = \frac{V}{I} \quad (4.22)$$

Metode ini sering digunakan dalam skala laboratorium dalam pengukuran nilai resistansi. Terdapat dia macam hubungan metode voltmeter-ampermeter yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.

$$D_1 = \tan \delta_1 = \frac{I_1 r_1}{\frac{I_1}{\omega C_1}} = \omega C_1 r_1 \text{ dan } D_2 = \tan \delta_2 = \frac{I_2 r_2}{\frac{I_2}{\omega C_2}} = \omega C_2 r_2 \quad (5.31)$$

dari persamaan (5.29), kita dapat

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{(R_2 + r_2)}{(R_1 + r_1)}$$

atau,

$$C_2 r_2 - C_1 r_1 = C_1 R_1 - C_2 R_2$$

atau,

$$\omega C_2 r_2 - \omega C_1 r_1 = \omega (C_1 R_1 - C_2 R_2)$$

Dengan menggunakan persamaan (5.31) kita dapat,

$$D - D = \omega (CR - CR)$$

atau,

$$D_2 - D_1 = \omega (C_1 R_1 - C_2 R_2)$$

Mensubstitusi nilai C1 ke persamaan (5.30)

$$D_2 - D_1 = \omega C_2 \left( \frac{R_1 R_2}{R_3} - R_2 \right) \quad (5.32)$$

Jadi, jika salah satu kapasitor diketahui nilai *dissipation factor* nya, maka kita dapat menghitung yang lain

#### 5.4.2 Jembatan Schering

Jembatan Schering merupakan metode yang sangat populer digunakan pada industri sekarang untuk perhitungan nilai kapasitansi dan factor disipasi. Gambar 6.12 merupakan ilustrasi

melalui kombinasi seri dari kapasitor  $C_2$  resistansi internalnya  $r_2$ .  $d_1$  dan  $d_2$  merepresentasikan *loss angles* pada kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$ . Penjumlahan fasor  $I_1 R_1$  dan  $V_{C1}$  menghasilkan total tahanan drop  $V_1$  pada lengan AB. Begitu pula pada penjumlahan fasor  $I_2 R_2$  dan  $V_{C2}$  menghasilkan total tahanan drop  $V_{C2}$  pada lengan AC. Sehingga penjumlahan fase  $V_1$  dan  $V_3$  atau  $V_2$  dan  $V_4$  menghasilkan tegangan supply.

Saat kondisi seimbang,

$$\frac{R_1 + r_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}{R_3} = \frac{R_2 + r_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}{R_4}$$

atau,

$$R_1 R_2 + r_1 R_4 - \frac{jR_4}{\omega C_1} = R_2 R_3 + r_2 R_3 - \frac{jR_3}{\omega C_2}$$

Menjumlahkan bagian real dan imajiner, kita dapat

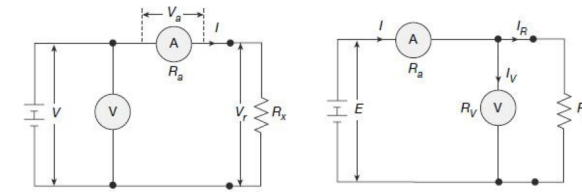
$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{(R_2 + r_2)}{(R_1 + r_1)} = \frac{R_4}{R_3} \quad (5.29)$$

Jadi,

$$C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (5.30)$$

Modifikasi Jembatan De Sauty juga dapat digunakan untuk memperkirakan *dissipation factor* pada kapasitor yang tidak diketahui nilainya seperti yang dijelaskan berikut:

*Dissipation factor* pada kapasitor didefinisikan sebagai



Gambar 4.6. Pengukuran resistansi dengan metode voltmeter-ammeter

Dengan:

$R_x$  = nilai sebenarnya resistansi yang diukur/ tidak diketahui

$R_m$  = nilai resistansi hasil pengukuran

$R_a$  = resistansi internal ammeter

$R_v$  = resistansi internal voltmeter

Dari kedua metode pada Gambar 4.6 (a) dan (b), nilai resistansi  $R_m$  seharusnya sama dengan nilai resistansi yang dicari ( $R_x$ ).

Pada metode A ammeter dihubungkan secara langsung dengan resistansi yang diukur, namun voltmeter dihubungkan melintang dari rangkaian seri yang dibentuk ammeter dan resistor  $R_x$ . Ammeter mengukur nilai sebenarnya arus yang melalui resistor, namun voltmeter tidak mengukur tegangan yang sebenarnya melewati resistor. Voltmeter mengukur jumlah drop tegangan yang melalui ammeter dan resistansi  $R_x$ . Jika voltmeter mengukur tegangan  $V$  dan ammeter membaca nilai arus  $I$ , maka nilai resistansi yang diukur  $R_m$  sesuai persamaan 4.22. Tegangan,  $V$ , pada persamaan 4.22 adalah

$$\begin{aligned} V &= V_a + V_x \\ V &= IR_a + IR_x \\ V &= I(R_a + R_x) \end{aligned} \quad (4.23)$$

Kesalahan yang dihasilkan dalam pengukuran didapatkan dengan persamaan:

$$\varepsilon = \frac{R_m - R_x}{R_x} = \frac{R_a}{R_x} \quad (4.24)$$

Dari persamaan 4.24 diketahui bahwa kesalahan yang dihasilkan oleh metode A dapat diabaikan jika rasio  $\frac{R_a}{R_x} \rightarrow 0$ . Jika resistansi yang diukur lebih tinggi dibanding resistansi ammeter, maka metode A dapat digunakan tanpa terdapat banyak kesalahan. Oleh karena itu metode A baik digunakan pada pengukuran resistansi tinggi.

Pada metode B, voltmeter dihubungkan secara langsung dengan resistansi yang akan diukur, namun ammeter dihubungkan seri dengan rangkaian paralel yang dibentuk voltmeter dan resistansi yang diukur ( $R_x$ ). voltmeter mengukur nilai drop tegangan sebenarnya yang melalui resistor, namun ammeter tidak mengukur nilai arus sebenarnya yang mengalir ke resistor. Ammeter mengukur jumlah arus yang melalui resistor dan voltmeter. Jika voltmeter mengukur tegangan  $V$  dan ammeter membaca nilai arus  $I$ , maka nilai resistansi yang diukur  $R_m$  sesuai persamaan 4.22, sehingga:

$$V = I_x \times R_x = I_v \times R_v \quad (4.25)$$

dan

$$I = I_v + I_R \quad (4.26)$$

Sehingga dari persamaan 4.22 didapatkan

Gambar 5.11 Jembatan De Sauty yang dimodifikasi dalam kondisi seimbang: (a) Konfigurasi, dan (b) Diagram Fasor

Kapasitor  $C_1$  yang tidak diketahui nilainya dengan resistansi internalnya,  $r_1$  merepresentasikan *losses* pada lengan AB dibandingkan dengan kapasitor standard  $C_2$  dengan resistansi internalnya  $r_2$  pada lengan AC. Resistor  $R_1$  dan  $R_2$  terhubung seri dengan  $C_1$  dan  $C_2$ , jembatan in dapat diseimbangkan dengan memvariasikan salah satu dari *non-inductive* resistor  $R_3$  dan  $R_4$ .

Jika dalam keadaan seimbang dan tidak ada arus listrik yang terdeteksi dalam rangkaian, node B dan C memiliki potensial yang sama, yaitu  $V_1 = V_2$  dan  $V_3 = V_4$ .

Seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 5.11(b),  $V_3 = I_1 R_3$  dan  $V_4 = I_2 R_4$  memiliki nilai dan fase yang sama.  $I_1$  pada lengan BD dan  $I_2$  pada lengan CD juga memiliki fase yang sama dengan  $I_1 R_3$  dan  $I_2 R_4$  dalam garis horizontal. Disisi lain *resistive drop*, dinamakan  $I_1 R_1$  pada lengan AB dan  $I_2 R_2$  pada lengan AC sama dalam garis horizontal. Sehingga *resistive drop* dalam kapasitor dinamakan,  $I_1 r_1$  dan  $I_1 r_2$  juga memiliki nilai dan fase yang sama. Tegangan kapasitif drop  $I_1/\omega C_1$  pada lengan AB lags (tertinggal) dengan  $I_1 r_1$   $90^\circ$ . Pada tegangan kapasitif drop  $I_2/\omega C_2$  pada lengan AC lags (tertinggal) dibelakang  $I_2 r_2$   $90^\circ$ . Penjumlahan fasor dari resistifitas  $I_1 r_1$  dan *quadrature* dari kapasitif drop  $I_1/\omega C_1$  menghasilkan total tegangan drop  $V_{C1}$  melalui kombinasi seri dari kapasitor  $C_1$  resistansi internalnya  $r_1$ . Sama seperti yang sebelumnya, penjumlahan fasor dari resistifitas  $I_2 r_2$  dan *quadrature* dari kapasitif drop  $I_2/\omega C_2$  menghasilkan total tegangan drop  $V_{C2}$

sumbu vertical seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.7 (b). Sehingga penjumlahan fase  $V_1$  dan  $V_3$  atau  $V_2$  dan  $V_4$  menghasilkan tegangan supply.

Saat kondisi seimbang,

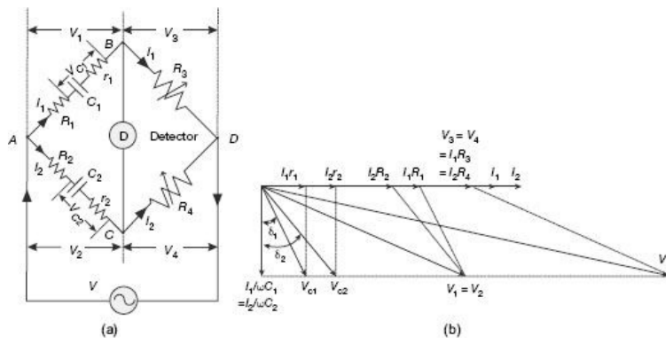
$$\frac{1}{j\omega C_1 R_3} = \frac{1}{j\omega C_2 R_4}$$

atau,

$$C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3} \tag{5.28}$$

Keuntungan dari jembatan De Sauty adalah cara perhitungan yang sederhana. Namun, keuntungan ini tidak akan berguna lagi jika ada faktor yang mengganggu pengukuran.

Ketika melakukan perhitungan pada kapasitor yang memiliki inherent dielectric losses, modifikasi Jembatan De Sauty yang diusulkan oleh Grover dapat digunakan. Jembatan ini sering disebut juga jembatan seri resistansi-kapasitansi. Konfigurasi dari jembatan dan pengoordinatesian diagram fasor dalam keadaan seimbang ditunjukkan pada gambar 5.11

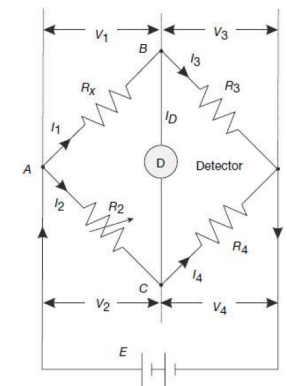


$$R_m = \frac{V}{I} = \frac{V}{I_v + I_R} = \frac{V}{\frac{V}{R_v} + \frac{V}{R_R}} \tag{4.27}$$

$$R_m = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{R_v}}$$

Nilai resistansi yang terukur ( $R_m$ ) dari resistor yang diperoleh lebih rendah dari nilai sebenarnya ( $R_x$ ) sesuai dengan nilai resistansi internal voltmeter. Dari persamaan 4.27 dapat dilihat bahwa nilai resistansi sebenarnya sama dengan nilai yang terukur jika nilai resistansi internal voltmeter adalah tak terhingga. Dengan kata lain jika resistansi internal voltmeter lebih tinggi dibanding resistansi yang diukur ( $R_v \gg R_a$ ) maka metode B dapat digunakan tanpa terdapat banyak kesalahan. Metode B baik digunakan pada pengukuran resistansi rendah.

### 4.2.3. Metode Jembatan Wheatstone



Gambar 4.7. Rangkaian Jembatan Wheatstone

Jembatan Wheatstone (Gambar 4.7) adalah rangkaian yang paling banyak digunakan dalam pengukuran resistansi sedang.

Jembatan Wheatstone terdiri dari empat lengan resistor, baterai (sumber tegangan) dan galvanometer (*null detector*).

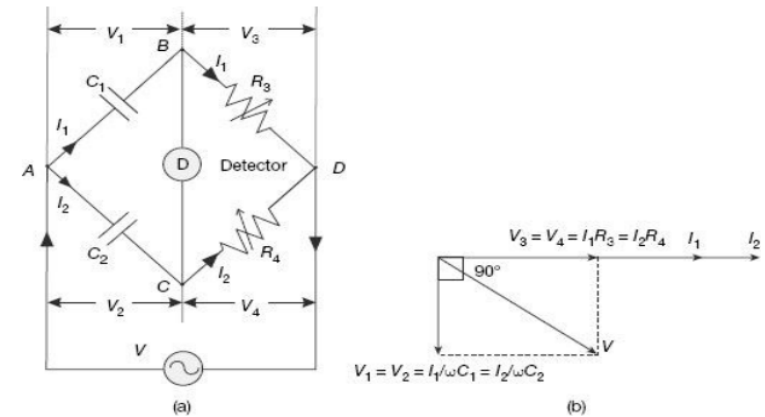
Pada rangkaian jembatan terdiri dari  $R_3$  dan  $R_4$  yang merupakan dua resistansi yang diketahui nilainya,  $R_2$  merupakan variable resistor dan  $R_x$  adalah resistansi yang akan diukur. Besar arus yang mengalir pada galvanometer ( $I_D$ ) tergantung dari beda potensial antara titik B dan C. Kondisi seimbang dari jembatan didapat dengan merubah nilai  $R_2$  dan memeriksa kondisi pointer galvanometer menunjukkan posisi nol. Pada kondisi seimbang, tidak ada arus yang mengalir pada galvanometer. Ini berarti pada kondisi seimbang potensial antara titik C dan D adalah sama. Kondisi keseimbangan diperoleh pada saat:

1. Pendeteksi arus menunjukkan angka nol, yaitu  $I_D=0$  dan  $I_1=I_3$  serta  $I_2=I_4$
2. Potensial pada titik B dan C nilainya sama, yaitu  $V_B=V_C$ , atau dengan kata lain drop tegangan pada lengan AB sama dengan drop tegangan pada lengan AC, atau  $V_{AB}=V_{AC}$  dan drop tegangan pada lengan BD sama dengan drop tegangan yang melewati lengan CD, atau  $V_{BD}=V_{CD}$

Dari hubungan  $V_{AB}=V_{AC}$ , diketahui  $I_1 \times R_x = I_2 \times R_2$ . Pada kondisi seimbang, galvanometer tidak mengalirkan arus sehingga bertindak sebagai rangkaian terbuka, sehingga:

$$I_1 = I_3 = \frac{E}{R_x + R_3} \quad (4.28)$$

$$I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_4} \quad (4.29)$$



Gambar 5.10 Jembatan De Sauty dalam keadaan seimbang, (a) konfigurasi, (b) diagram fasor

Kapasitor  $C_1$  yang tidak diketahui pada cabang AB dibandingkan dengan kapasitor  $C_2$  yang diketahui pada lengan AC. Rangkaian jembatan ini dapat diseimbangkan dengan memvariasikan Antara *non-inductive* resistor  $R_3$  atau  $R_4$ .

Jika dalam keadaan seimbang dan tidak ada arus listrik yang terdeteksi dalam rangkaian, node B dan C memiliki potensial yang sama, yaitu  $V_1 = V_2$  dan  $V_3 = V_4$ .

Seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 6.7(b),  $V_3 = I_1 R_3$  dan  $V_4 = I_2 R_4$  memiliki nilai dan fase yang sama.  $I_1$  pada lengan BD dan  $I_2$  pada lengan CD juga memiliki fase yang sama dengan  $I_1 R_3$  dan  $I_2 R_4$  dalam garis horizontal. Tegangan kapasitif drop  $V_1 = I_1 / \omega C_1$  pada lengan AB lags (tertinggal) dengan  $I_1$   $90^\circ$ . Pada tegangan kapasitif drop  $V_2 = I_2 / \omega C_2$  pada lengan AC lags (tertinggal) dibelakang  $I_2$   $90^\circ$ . Dalam keadaan seimbang kedua tegangan drop  $V_1$  dan  $V_2$  menjadi sebanding nilai fase dan magnitudenya,  $V_1$  dan  $V_2$  saling tumpang tindih di sepanjang

tinggi. Kapasitor yang baik akan memiliki nilai DF dan *loss tangent* yang rendah. Selain ESE, DF, dan *loss tangent*, parameter lain yang digunakan untuk mengukur kinerja kapasitor nyata adalah faktor kualitas atau Faktor-Q. Intinya untuk sebuah kapasitor, rasio energi yang tersimpan yang dilepaskan per siklus.

$$Q = \frac{i^2 X_C}{i^2 R} = \frac{X_C}{R}$$

Dengan demikian faktor-Q dapat dinyatakan sebagai rasio kapasitif dan reaktansi terhadap ESR pada frekuensi tertentu.

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{DF} = \frac{1}{\tan \delta}$$

Kapasitor berkualitas tinggi akan memiliki faktor disipasi yang rendah dan *loss tangent* yang rendah juga.

Metode yang paling umum digunakan untuk pengukuran kapasitansi adalah jembatan De Sauty dan Jembatan Schering

### 5.4.1 Jembatan De Sauty

Metode ini merupakan metode yang cukup mudah untuk menentukan nilai kapasitansi kapasitor pada kapasitor yang normal. Konfigurasi dan diagram fasor jembatan De Sauty dalam keadaan seimbang ditunjukkan pada gambar 5.10

Sehingga didapatkan

$$\begin{aligned} \frac{E}{R_x + R_3} \times R_x &= \frac{E}{R_2 + R_4} \times R_2 \\ \frac{R_x + R_3}{R_x} &= \frac{R_2 + R_4}{R_2} \\ \frac{R_x + R_3}{R_x} - 1 &= \frac{R_2 + R_4}{R_2} - 1 \\ \frac{R_x + R_3 - R_x}{R_x} &= \frac{R_2 + R_4 - R_2}{R_2} \\ \frac{R_3}{R_x} &= \frac{R_4}{R_2} \\ R_x &= R_2 \times \frac{R_3}{R_4} \end{aligned} \tag{4.30}$$

Pengukuran nilai resistansi yang dicari ditentukan oleh keadaan 3 resistansi yang nilainya telah diketahui. Lengan jembatan DC dan CD terdiri dari  $R_3$  dan  $R_4$  yang disebut sebagai *ratio arm*. Lengan AC terdiri dari *variable resistance*  $R_2$  disebut sebagai *standard arm*. Rentang nilai resistansi yang dapat diukur dengan metode jembatan dapat dinaikkan dengan rasio  $R_3/R_4$ .

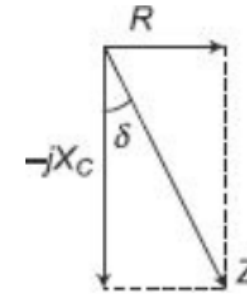
Jembatan Wheatstone cukup baik dan akurat digunakan untuk pengukuran resistansi. Namun metode ini juga memiliki kekurangan, antara lain:

1. Perbedaan antara nilai sebenarnya dan yang tertera pada resistansi tiga lengan yang diketahui dapat menyebabkan kesalahan.
2. Ketidaktepatan titik keseimbangan karena sensitivitas yang tidak cukup dari galvanometer dapat menghasilkan titik nol palsu.

3. Resistansi jembatan dapat berubah karena pemanasan sendiri/ perubahan suhu ( $I^2R$ ) yang mengakibatkan kesalahan dalam perhitungan pengukuran.
4. Ggl termal yang dihasilkan di rangkaian jembatan atau di galvanometer pada titik koneksi dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran.
5. Dapat terjadi kesalahan pembacaan oleh pengguna yang mengakibatkan kesalahan hasil pembacaan.

### 4.3. Pengukuran Resistansi Rendah

Resistor dengan nilai resistansi kurang dari  $1\Omega$  dapat dikelompokkan dalam kategori resistansi rendah. Pada praktiknya kategori ini dapat ditemui pada belitan tembaga di armature, ampermeter shunt, saklar dan lain sebagainya. Metode untuk pengukuran resistansi rendah berbeda dengan pengukuran resistansi sedang dan tinggi. Pengukuran resistansi sedang tidak cocok untuk pengukuran resistansi rendah. Hal ini disebabkan adanya fakta bahwa meskipun nilai resistansi kontak kecil, nilainya lebih besar dari resistansi rendah. Sebagai contoh, sebuah resistansi kontak adalah  $0,001\ \Omega$  menyebabkan kesalahan yang dapat diabaikan ketika mengukur resistansi sedang, contoh  $100\ \Omega$ , namun resistansi kontak yang sama menyebabkan kesalahan 10% ketika mengukur resistansi rendah pada nilai  $0,01\ \Omega$ . Oleh karena itu diperlukan teknik khusus dalam mengukur besarnya resistansi rendah agar tidak terjadi kesalahan akibat kontak. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengukur resistansi rendah

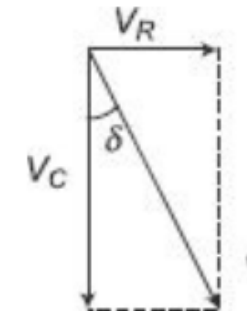


Gambar 5.8 Diagram segitiga impedansi

$$\tan \delta = \frac{R}{X_c} = \frac{R}{1/\omega C} = \omega CR$$

Loss tangen dari kapasitor nyata dapat didefinisikan dalam diagram segitiga tegangan sebagai perbandingan dari tenaga drop yang melalui ESR ke kapasitor.

$$\tan \delta = \frac{V_R}{V_C} = \frac{iR}{iX_c} = \frac{R}{1/\omega C} = \omega CR$$

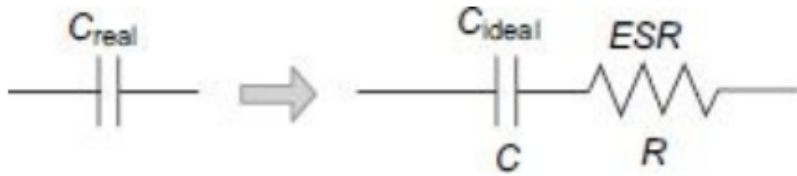


Gambar 5.9 Diagram segitiga tegangan

Meskipun persamaan untuk faktor disipasi (DF) dan *loss tangent* sama, biasanya DF digunakan pada aplikasi berfrekuensi lebih rendah, sedangkan *loss tangent* pada aplikasi frekuensi



Dalam kenyataannya, energi yang terbuang dari kapasitor dapat nyatakan ekivalen dari rangkaian seri dari kapasitor dengan ESR.



Gambar 5.7 Rangkaian Ekivalen Resistansi (Equivalent Series Resistance)

Parameter kuantifikasi yang sering digunakan untuk menggambarkan kinerja kapasitor adalah *ESR*, *Factor Dissipation (FD)*, *Factor Quality (Factor-Q)*, dan Kerugian Tangen (*tan-d*). Tidak hanya itu yang menjadi parameter kerja kapasitor dalam pengaplikasian *Radio Frequency (RF)*, namun *ESR* dan *DF* sangat penting jika dalam rangkaian *power supply* yang memiliki *DF* besar akan mengakibatkan daya yang terbuang besar juga.

Secara matematis nilai *DF* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

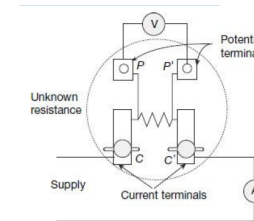
$$DF = \frac{i^2 R}{i^2 X_c} = \frac{R}{1/\omega C} = \omega CR$$

Ketika berhubungan dengan fasor rangkaian listrik, *DF* kapasitor sama dengan besar sudut tangen dari impedansi fasor dengan negatif reaktif, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.8

adalah metode voltmeter-ampermeter, metode jembatan ganda Kelvin dan metode potensiometer.

### 4.3.1. Metode Voltmeter-Ampermeter

Pada prinsipnya, metode voltmeter-ampermeter untuk pengukuran resistansi rendah sama dengan pengukuran yang digunakan dalam pengukuran resistansi medium yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Metode ini sangat umum digunakan untuk pengukuran resistansi rendah ketika akurasi sebesar 1% sudah cukup. Namun diperlukan konstruksi khusus dari elemen resistensi untuk dapat digunakan untuk pengukuran resistansi rendah. Resistansi rendah dibangun dengan empat terminal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Metode voltmeter-ampermeter pada pengukuran resistansi rendah

Dari Gambar 4.8 sepasang terminal *CC'*, disebut sebagai terminal arus, digunakan membawa arus masuk dan keluar dari resistor. Drop tegangan yang melewati resistor diukur diantara sepasang terminal lain *PP'*, yang disebut dengan terminal tegangan. Tegangan yang ditunjukkan voltmeter adalah penurunan tegangan di resistor pada terminal tegangan *PP'* dan tidak termasuk penurunan resistansi sambungan yang mungkin ada di terminal arus. Namun, penurunan sambungan pada terminal tegangan

sangat kecil karena arus yang mengalir melalui sambungan sangat kecil (mencapai nol pada kondisi keseimbangan “null”). Hal ini disebabkan karena keterlibatan resistansi tinggi di terminal tegangan. Selain itu, karena rangkaian potensial memiliki resistansi voltmeter tinggi di dalamnya, setiap penurunan resistansi sambungan di terminal tegangan akan diabaikan sehubungan dengan resistansi tinggi yang terlibat dalam rangkaian potensial.

$$R_x = \frac{\text{Pembacaan voltmeter}}{\text{Pembacaan amperemeter}} \quad (4.31)$$

Nilai resistansi  $R_x$  yang tidak diketahui dapat dirumuskan dengan persamaan 4.31. Pengukuran yang tepat dalam metode ini mensyaratkan bahwa resistansi voltmeter menjadi cukup tinggi. Jika hal ini tidak dipenuhi maka voltmeter saat ini akan menjadi bagian kecil dari arus yang sebenarnya mengalir melalui amperemeter, dan kesalahan serius dapat terjadi dalam kasus tersebut.

#### 4.3.2. Metode Jembatan Ganda Kelvin (*Kelvin's Double Bridge*)

Metode jembatan ganda Kelvin adalah salah satu metode terbaik yang dapat digunakan untuk pengukuran resistansi rendah. Metode ini merupakan modifikasi dari jembatan Wheatstone dengan kesalahan karena resistansi sambungan dapat diabaikan. Gambar 4.9 merupakan rangkaian jembatan ganda Kelvin untuk pengukuran tegangan rendah.

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{R_2 R_3 C_4}{1 + \omega(R_4 + r_4)^2 C_4^2} \\ &= \frac{2400 \times 600 \times 0.3 \times 10^{-6}}{1 + (2\pi \times 450 \times 55.9 \times 0.3 \times 10^{-6})^2} \\ &= 0.43 \text{ H} \end{aligned}$$

dan

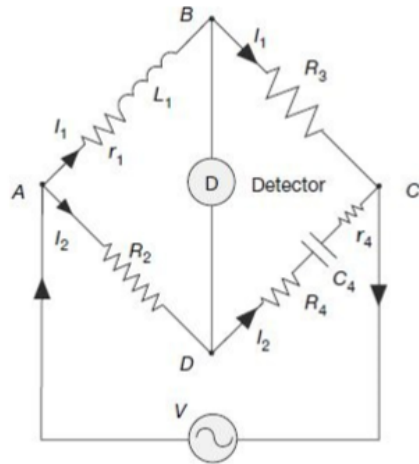
$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{R_2 R_3 (R_4 + r_4) \omega^2 C_4^2}{1 + \omega(R_4 + r_4)^2 C_4^2} \\ &= \frac{2400 \times 600 \times 55.9 \times (2\pi \times 450)^2 \times (0.3 \times 10^{-6})^2}{1 + (2\pi \times 450 \times 55.9 \times 0.3 \times 10^{-6})^2} \\ &= 57.8 \Omega \end{aligned}$$

### 5.4 Pengukuran Kapasitansi

Jembatan digunakan untuk membuat perhitungan yang presisi pada kapasitansi yang tidak diketahui. Sebuah kapasitor yang ideal disebut jika dibuat dari menempatkan benda dielektrik diantara dua logam konduktif atau elektroda. Dalam kenyataannya bahan dielektrik akan memiliki daya yang hilang (losses), hal ini diakibatkan oleh konduksi elektron pada dielektrik dan juga relaksasi dipole. Pada kapasitor yang ideal tidak ada daya yang terbuang, sedangkan pada kapasitor yang sering digunakan dalam kenyataan akan memiliki daya yang terbuang meskipun itu kecil. Energi potensial yang terbuang pada kapasitor yaitu energi yang berubah menjadi panas dalam kapasitor. Energi yang terbuang ini secara ekivalen diwakili oleh resistansi seri, yang disebut *Equivalent Series Resistance* (ESR).

Solusi Konfigurasi jembatan ditunjukkan di bawah ini:

Mengingat bahwa pada keseimbangan,



$$R_2 = 2400 \Omega, R_3 = 600 \Omega, C_4 = 0.3 \mu\text{F},$$

$$R_4 = 55.4 \Omega \text{ dan } r_4 = 0.5 \Omega$$

Seimbang,

$$\frac{r_1 + j\omega L_1}{R_3} = \frac{R_2}{r_4 + R_4 - \frac{j}{\omega C_4}}$$

atau,

$$r_1 r_4 + r_1 R_4 + \frac{L_1}{C_4} + j\omega L_1 R_4 + j\omega L_1 r_4 - \frac{j r_1}{\omega C_4} = R_2 R_3$$

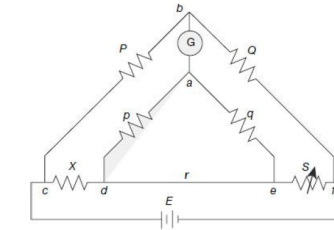
menyamakan bagian nyata dan imajiner,

$$r_1 r_4 + r_1 R_4 \frac{L_1}{C_4} = R_2 R_3 \text{ (i)}$$

dan

$$\omega L_1 R_4 + \omega L_1 r_4 = \frac{r_1}{\omega C_4} \text{ (ii)}$$

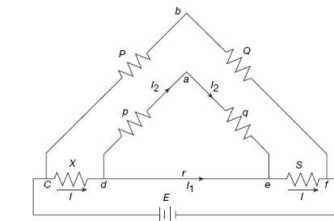
Pemecahan (i) dan (ii), maka didapatkan



Gambar 4.9. Metode jembatan ganda Kelvin

Jembatan ganda Kelvin menggabungkan ide sepasang lengan rasio, yaitu, p dan q, dan karenanya disebut 'jembatan ganda'/ *double bridges*. X adalah resistansi rendah yang tidak diketahui untuk diukur, dan S adalah resistansi nilai rendah standar yang diketahui. 'r' adalah kabel penghubung resistansi yang sangat rendah yang digunakan sambungkan resistansi yang tidak diketahui X ke resistansi standar S. Nilai resistansi lain P, Q, p dan q berada pada kisaran sedang. Keseimbangan dalam jembatan dicapai dengan menyesuaikan nilai S.

Pada kondisi keseimbangan, tegangan pada titik a dan b bernilai sama dengan tujuan galvanometer 'G' dapat menunjukkan defleksi "null". Karena seimbang, tidak ada arus yang mengalir melalui galvanometer, maka dapat dianggap sebagai rangkaian terbuka dan rangkaian dapat diwakili oleh Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Jembatan ganda Kelvin pada kondisi seimbang

Pada kondisi seimbang, tegangan pada titik  $a$  dan  $b$  sama, sehingga:

$$V_{cb} = V_{cda} \quad (4.32)$$

Sehingga

$$V_{cb} = E \times \frac{P}{P + Q} \quad (4.33)$$

dan

$$V_{cda} = V_{cd} + V_{da} = X \times I + p \times I_2 \quad (4.34)$$

dengan

$$I_2 = I \times \frac{r}{r + p + q} \quad (4.35)$$

Sehingga

$$V_{cda} = I \times X + I \times \frac{pr}{r + p + q} = I \left( X + \frac{pr}{r + p + q} \right) \quad (4.36)$$

Tegangan sumber dapat dirumuskan

$$E = V_{cd} + V_{de} + V_{ef} = I \times X + I \times \frac{(p + q)}{p + q + r} \times r + I \times S \quad (4.37)$$

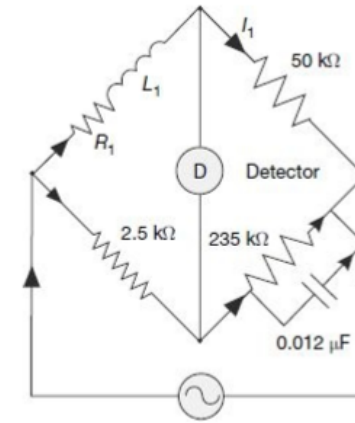
Atau

$$E = I \left( X + S + \frac{(p + q)}{p + q + r} \times r \right) \quad (4.38)$$

Dari persamaan 4.37 dan 4.38 didapatkan

$$V_{cb} = \frac{P}{P + Q} \times I \left( X + S + \frac{(p + q)}{p + q + r} \times r \right) \quad (4.39)$$

Persamaan keseimbangan  $V_{cb} = V_{cda}$  dapat ditulis menjadi



$$L_1 = C_4 R_2 R_3 = 0.012 \times 10^{-6} \times 2.5 \times 10^3 \times 50 \times 10^3 = 1.5 \text{ H}$$

$$\text{dan } R_1 = R_2 \times \frac{R_3}{R_4} = 2.5 \times 10^3 \times \frac{50 \times 10^3}{235 \times 10^3} = 0.53 \text{ k}\Omega$$

### Contoh 5.3

Keempat lengan jembatan terhubung sebagai berikut:

Lengan AB:  $L_1$  kumparan tersumbat dengan resistansi seri yang setara  $r_1$

Lengan BC: Resistansi tidak induktif  $R_3$

Lengan CD: Sebuah kapasitor mika  $C_4$  dalam rangkaian resistansi  $R_4$  tidak induktif

Lengan DA: Resistansi tidak induktif  $R_2$

Ketika jembatan disuplai dari sumber 450 Hz diberikan antara terminal A dan C dan detektor terhubung antara node B dan D, keseimbangan diperoleh kondisi berikut:  $R_2 = 2400 \Omega$ ,  $R_3 = 600 \Omega$ ,  $C_4 = 0,3 \mu\text{F}$  dan  $R_4 = 55,4 \Omega$ . Resistansi seri kapasitor adalah  $0,5 \Omega$ . Hitung resistansi dan induktansi kumparan tersumbat.

$$\frac{(R_1 + j\omega L_1)}{R_3} = \frac{\left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right)}{\frac{1}{j\omega C_4}}$$

Menyederhanakan dan memisahkan bagian nyata dan imajiner, jumlah yang tidak diketahui dapat ditemukan sebagai

$$R_1 = R_3 \frac{C_4}{C_2} \quad (5.26)$$

dan

$$L_1 = R_2 R_3 C_4 \quad (5.27)$$

Dengan demikian dimungkinkan untuk memiliki dua variabel independen  $C_2$  dan  $R_2$  untuk mendapatkan keseimbangan di jembatan Owen. Persamaan keseimbangan juga cukup sederhana. Namun, ini datang dengan biaya tambahan untuk kapasitor variable

### Contoh 5.2

Jembatan induktansi-kapasitansi Maxwell digunakan untuk mengukur impedansi induktif yang tidak diketahui. Konstanta jembatan pada keseimbangan jembatan adalah: Lengan resistensi murni = 2,5 k $\Omega$  dan 50 k $\Omega$ . Di antara dua resistor ini, lengan ketiga memiliki kapasitor bernilai 0,012  $\mu$ F secara seri dengan resistor bernilai 235 k $\Omega$ . Temukan seri yang setara dengan impedansi yang tidak diketahui.

Solusi Mengacu pada diagram jembatan induktansi-kapasitansi Maxwell:

Menggunakan persamaan keseimbangan,

$$\frac{P}{P+Q} \times I \left( X + S + \frac{(p+q)}{p+q+r} \times r \right) = I \left( X + \frac{pr}{r+p+q} \right) a \quad (4.40)$$

Atau

$$\left( X + S + \frac{(p+q)}{p+q+r} \times r \right) = \left( 1 + \frac{Q}{P} \right) \times \left( X + \frac{pr}{r+p+q} \right)$$

$$X + S + \frac{(p+q)}{p+q+r} \times r$$

$$= X + \frac{pr}{r+p+q} + \frac{Q}{P} \times X + \frac{Q}{P} \times \frac{pr}{r+p+q} a$$

$$S + \frac{p+q}{r+p+q} r = \frac{pr}{r+p+q} + \frac{Q}{P} \times X + \frac{Q}{P} \times \frac{pr}{r+p+q} a$$

$$\frac{Q}{P} \times X = S + \frac{(p+q)}{r+p+q} r - \frac{pr}{r+p+q} - \frac{Q}{P} \times \frac{pr}{r+p+q} \quad (4.41)$$

$$\frac{Q}{P} \times X = S + \frac{pr}{p+q+r} + \frac{qr}{p+q+r} - \frac{pr}{r+p+q}$$

$$- \frac{Q}{P} \times \frac{pr}{r+p+q}$$

$$\frac{Q}{P} \times X = S + \frac{qr}{p+q+r} - \frac{Q}{P} \times \frac{pr}{r+p+q}$$

$$\frac{Q}{P} \times X = S + \frac{qr}{p+q+r} \left( 1 - \frac{Q}{P} \times \frac{p}{q} \right) a$$

Sehingga

$$X = \frac{P}{Q} \times S + \frac{qr}{p+q+r} \left( \frac{P}{Q} - \frac{p}{q} \right) \quad (4.42)$$

Nilai  $\frac{qr}{p+q+r} \left( \frac{P}{Q} - \frac{p}{q} \right)$  dapat dibuat sangat kecil dengan rasio  $\frac{P}{Q}$  mendekati nilai  $\frac{p}{q}$ . Pada kasus tersebut tidak ada efek pemasangan resistor 'r' untuk menghitung resistansi yang tidak diketahui. Maka dari itu, nilai resistansi yang tidak diketahui X dapat ditulis kembali

$$X = \frac{P}{Q} \times S \quad (4.43)$$

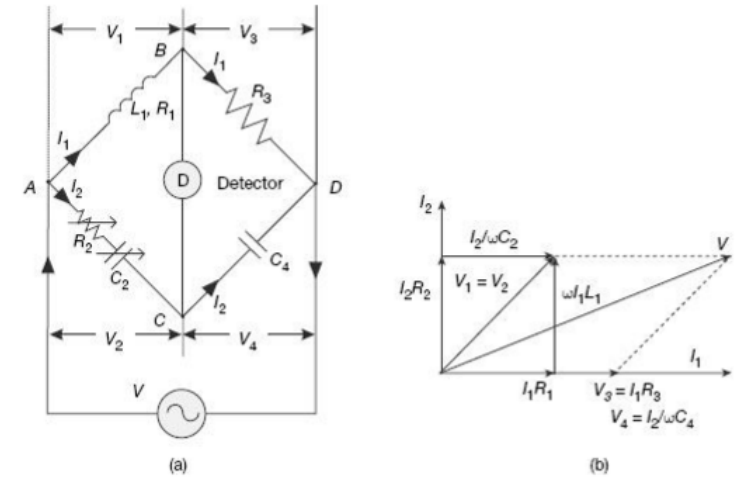
Namun, dalam praktiknya, tidak pernah mungkin untuk membuat rasio  $\frac{P}{Q}$  persis sama dengan  $\frac{p}{q}$ . Jadi, selalu ada kesalahan kecil sebesar  $\Delta = \frac{P}{Q} - \frac{p}{q}$ , sehingga resistansi menjadi

$$X = \frac{P}{Q} \times S + \frac{qr}{p+q+r} \times \Delta \times r \quad (4.44)$$

Oleh karena itu nilai 'r' perlu dijaga sekecil mungkin, sehingga produk  $\Delta \times r$  sangat kecil dan oleh karenanya kesalahannya dapat diabaikan, dan dapat diasumsikan dalam kondisi seimbang.

### 4.3.3. Metode Potensiometer

Rangkaian pengukuran resistansi rendah menggunakan potensiometer dapat dilihat pada Gambar 4.11. Resistansi yang tidak diketahui  $X$  dihubungkan secara seri dengan resistansi standar  $S$ . Arus melalui amperemeter pada rangkaian dikendalikan oleh rheostat. Pada metode ini digunakan sakelar ganda dua kutub. Ketika sakelar berada di posisi 1-1', resistansi yang tidak diketahui  $X$  akan terhubung ke potensiometer, sedangkan ketika sakelar berada di posisi 2-2', resistansi standar  $S$  akan terhubung ke potensiometer.



Gambar 5.6 Jembatan Owen dalam kondisi seimbang: (a) Konfigurasi (b) Diagram Fasor

Penurunan tegangan induktif  $I_1 L_1$  ketika ditambahkan dalam quadrature dengan penurunan tegangan resistif  $I_1 R_1$  memberikan total penurunan tegangan  $V_1$  melintasi lengan AB. Dalam kondisi keseimbangan, tegangan turun pada lengan AB dan AC sama, tegangan  $V_1$  dan  $V_2$  bertepatan satu sama lain seperti yang ditunjukkan dalam diagram fasor pada Gambar 5.6 (b). Tegangan  $V_2$  sekali lagi merupakan penjumlahan dari dua tegangan quadrature yang saling menurunkan  $I_2 R_2$  (resistif) dan  $I_2 / C_2$  (kapasitif) pada lengan AC. Perlu dicatat di sini bahwa  $I_2$  saat ini menyebabkan tegangan  $V_4$  sebesar  $90^\circ$  karena adanya kapasitor  $C_4$ . Ini membuat  $I_2$  dan karenanya  $I_2 R_2$  menjadi vertikal, seperti yang ditunjukkan dalam diagram fasor. Akhirnya, penjumlahan fasor  $V_1$  dan  $V_3$  (atau  $V_2$  dan  $V_4$ ) menghasilkan tegangan suplai  $V$ .

$$R_1 \frac{R_2 R_3}{R_4} - r_1 \quad (5.24)$$

$$L_1 = C \frac{R_3}{R_4} [r(R_2 + R_4) + R_2 R_4] \quad (5.25)$$

Keuntungan jembatan Anderson dibandingkan jembatan Maxwell adalah bahwa dalam hal ini kapasitor nilai tetap digunakan sehingga sangat mengurangi biaya.

### 5.3.5 Jembatan Owen

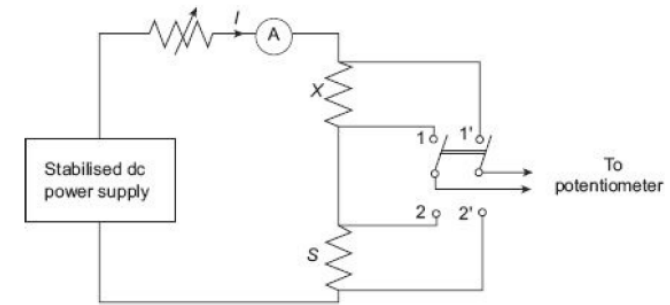
Jembatan ini digunakan untuk pengukuran induktansi yang tidak diketahui dalam hal kapasitansi nilai yang diketahui.

Gambar 5.6 menunjukkan konfigurasi jembatan Owen dan diagram fasor yang sesuai dalam kondisi seimbang.

Induktor  $L_1$  yang tidak diketahui dari resistansi efektif  $R_1$  di cabang AB dibandingkan dengan kapasitor  $C_2$  yang diketahui standar pada lengan AC. Jembatan diseimbangkan dengan memvariasikan  $R_2$  dan  $C_2$  secara independen.

Dalam kondisi seimbang, karena tidak ada arus yang mengalir melalui detektor, node B dan C berada pada potensial yang sama, yaitu,  $V_1 = V_2$  dan  $V_3 = V_4$ .

Seperti ditunjukkan dalam diagram fasor pada Gambar 5.5 (b),  $I_1, V_1 = I_1 R_3$  dan  $V_4 = I_2 / \omega C_4$ . semuanya dalam fase yang sama di sepanjang sumbu horizontal. Penurunan tegangan resistif  $I_1 R_1$  di lengan AB juga dalam fase yang sama



Gambar 4.11. Pengukuran resistansi rendah menggunakan potensiometer

Potensiometer dipercaya dapat memberikan nilai tegangan yang akurat. Oleh karena itu, dengan keadaan saklar pada posisi 1-1', potensiometer akan membaca drop tegangan yang melewati resistansi yang tidak diketahui  $X$  yang dirumuskan dengan

$$V_x = I \times X \quad (4.45)$$

Tanpa mengubah parameter apapun pada pengujian sebelumnya, saklar terhubung ke posisi 2-2', potensiometer akan menunjukkan nilai resistansi standar  $S$  yang dirumuskan dengan

$$V_s = I \times S \quad (4.46)$$

Dari persamaan tersebut didapatkan nilai resistansi yang tidak diketahui sebesar

$$X = \frac{V_x}{V_s} \times S \quad (4.47)$$

Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa akurasi pembacaan nilai resistansi standar menjadi sangat penting dalam menentukan nilai  $X$ . Semakin akurat pembacaan nilai resistansi standar akan memberikan pembacaan nilai resistansi yang tidak diketahui lebih akurat. Namun akurasi dari metode ini, tergantung

pada asumsi bahwa nilai arus tetap benar-benar konstan selama dua kali pengukuran. Oleh karena itu, catu daya dc yang sangat stabil diperlukan dalam metode ini.

Nilai resistor standar  $S$  harus memiliki orde yang sama dengan resistansi yang tidak diketahui  $X$ . Ampermeter yang dimasukkan ke dalam rangkaian tidak memiliki fungsi lain selain hanya menunjukkan apakah ada arus yang mengalir dalam rangkaian tidak. Nilai yang tepat dari arus tidak diperlukan untuk perhitungan akhir. Namun demikian, diinginkan bahwa arus yang mengalir melalui rangkaian diatur sedemikian rupa sehingga penurunan tegangan pada masing-masing resistor berurutan 1 V agar sesuai untuk pengukuran yang akurat dengan potensiometer yang tersedia di pasaran.

#### 4.4. PENGUKURAN RESISTANSI TINGGI

Resistansi tinggi dari orde ratusan hingga ribuan megaohm sering dijumpai pada peralatan listrik dalam bentuk resistansi isolasi mesin dan kabel, resistansi kebocoran kapasitor, resistivitas volume dan permukaan dari berbagai bahan dan struktur insulasi yang berbeda. Terdapat beberapa kesulitan yang dihadapi dalam melakukan pengukuran resistansi tinggi, antara lain:

1. Resistansi yang diukur memiliki nilai yang sangat tinggi, arus yang sangat kecil ditemui di rangkaian pengukuran. Tindakan pencegahan dan perawatan yang memadai perlu dilakukan untuk mengukur arus bernilai rendah tersebut.

dan

$$V_{BD} = V_{ED}, \text{ atau } I_1 R_3 = I_C \times \frac{1}{j\omega C}$$

$$I_C = j\omega I_1 R_3 C \quad (5.19)$$

Persamaan lainnya adalah:

$$V_{AB} = V_{AC} + V_{CE}, \text{ atau } I_1(r_1 + R_1 + j\omega L_1) = I_2 R_2 + I_C r \quad (5.20)$$

dan

$$V_{CD} = V_{CE} + V_{ED}, \text{ atau } I_C \left( r + \frac{1}{j\omega C} \right) = (I_2 - I_C) R_4 \quad (5.21)$$

Menempatkan nilai  $I_C$  dari Persamaan. (5.19) dalam Persamaan. (5.20), kami memiliki:  $I_r (+ R + j\omega L = IR + j\omega L R_C r$

$$I_1(r_1 + R_1 + j\omega L_1) = I_2 R_2 + j\omega I_1 R_3 C r$$

$$I_1(r_1 + R_1 + j\omega L_1 - j\omega R_3 C r) = I_2 R_2 \quad (5.22)$$

Kemudian, menempatkan nilai  $I_C$  dari Persamaan. (5.19) dalam Persamaan. (5.21), kami memiliki:

$$j\omega I_1 R_3 C \left( r + \frac{1}{j\omega C} \right) = (I_2 - j\omega I_1 R_3 C) R_4$$

atau,

$$I_1(j\omega R_3 C r + R_3 + j\omega R_3 C R_4) = I_2 R_4 \quad (5.23)$$

Dari Persamaan (5.22) dan (5.23), kami memperoleh:

$$I_1(r_1 + R_1 + j\omega L_1 - j\omega R_3 C r) = I_1(j\omega R_3 C r + R_3 + j\omega R_3 C R_4) \frac{R_2}{R_4}$$

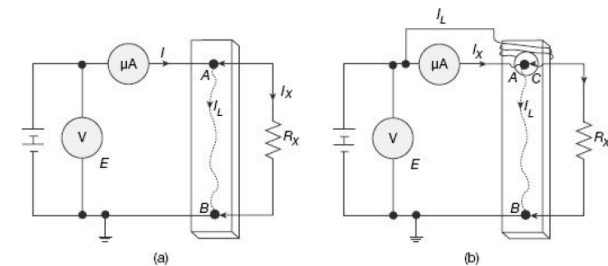
Menyamakan bagian nyata dan imajiner, kita dapatkan



C dan ketiga fasor berada dalam fase yang sama.  $I_1$  arus yang sama, ketika mengalir melalui lengan AB menghasilkan penurunan tegangan  $I_1 (R_1 + r_1)$  yang sekali lagi, dalam fase dengan  $I_1$ . Karena dalam kondisi seimbang, tidak ada arus yang mengalir melalui detektor, arus  $I_c$  yang sama mengalir melalui resistansi di lengan CE dan kemudian melalui kapasitor C di lengan ED. Penjumlahan fasor dari tegangan akan menurunkan  $I_c r$  di lengan CE dan  $I_c$  dengan C di lengan ED akan sama dengan penurunan tegangan  $V_4$  yang melintasi lengan CD.  $V_4$  mengalami penurunan tegangan pada resistansi  $R_4$  pada lengan CD,  $I_4$  dan  $V_4$  saat ini akan berada pada fase yang sama. Seperti yang dapat dilihat dari sirkuit jembatan Anderson, dan juga diplot dalam diagram fasor, penjumlahan fasor dari arus  $I_4$  di lengan CD dan  $I_c$  saat ini di lengan CE akan menimbulkan  $I_2$  pada lengan AC.  $I_2$  yang melewati hambatan  $R_2$  akan memunculkan penurunan tegangan  $V_2 = I_2 R_2$  melintasi lengan AC yang berada dalam fase dengan  $I_2$  saat ini. Karena, di bawah keseimbangan, potensial pada node B dan E adalah sama, tegangan turun antara node A -B dan antara A -C -E akan sama. Dengan demikian, penjumlahan fasor dari penurunan tegangan  $V_2 = I_2 R_2$  di lengan AC  $I_c r$  di lengan CE akan membuat tegangan  $V_1$  melintasi lengan AB. Tegangan  $V_1$  juga dapat diperoleh dengan menambahkan tegangan turun resistif  $I_1 (R_1 + r_1)$  dengan penurunan tegangan induktif quadrature  $I_1 L_1$  di lengan AB. Akhirnya, penjumlahan fasor  $V_1$  dan  $V_3$  (atau  $V_2$  dan  $V_4$ ) menghasilkan tegangan suplai V.

Pada keseimbangan,  $I_2 = I_c + I_4$

2. Kebocoran permukaan adalah kesulitan utama yang dihadapi saat pengukuran resistansi tinggi. Tahanan dari resistansi yang diukur mungkin cukup tinggi untuk menghambat aliran arus yang melaluinya, tetapi karena kelembaban, debu, dll., permukaan resistor dapat memberikan jalur resistansi yang lebih rendah untuk arus melewati antara dua elektroda pengukur. Dengan kata lain dimungkinkan terjadi kebocoran arus yang mengalir melalui permukaan. Jalur kebocoran tidak hanya memberikan pengaruh buruk terhadap hasil tes, tetapi juga umumnya bervariasi dari hari ke hari, tergantung pada kondisi suhu dan kelembaban. Efek jalur kebocoran pada pengukuran dapat dihilangkan dengan menggunakan sirkuit pelindung seperti dijelaskan oleh Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Pengaman rangkaian pengukuran resistansi tinggi

Pada Gambar 4.12 (a) menunjukkan  $R_x$  merupakan resistansi tinggi yang dipasang pada blok isolasi. Baterai bersama dengan voltmeter dan mikro-ammeter digunakan untuk mengukur resistansi dengan metode voltmeter-ammeter. Resistansi  $R_x$  yang diukur dipasang pada blok

isolasi pada dua terminal pengikat A dan B.  $I_x$  adalah arus aktual yang mengalir melalui resistansi tinggi dan  $I_L$  adalah arus bocor permukaan yang mengalir di atas permukaan blok isolasi. mikro-ammeter, dalam hal ini, membaca arus aktual melalui resistor, dan juga arus bocor ( $I = I_x + I_L$ ). Nilai hambatan yang diukur dihitung dari rasio  $E/I$  tidak akan menjadi nilai sebenarnya dari  $R_x$ , tetapi akan terjadi beberapa kesalahan.

Adanya kesalahan yang dihasilkan pada pengukuran Gambar 4.12 (a) dapat dihindari dengan modifikasi penambahan pelindung seperti Gambar 4.12 (b). pelindung disusun di satu ujung terhubung ke sisi baterai dari ammeter mikro, dan ujung lainnya dibungkus tubuh isolasi dan mengelilingi terminal resistansi A. Arus bocor permukaan sekarang mengalir melalui pelindung ini dan memotong mikro-ammeter. Dengan demikian, mikro-ammeter membaca kebenaran arus  $I_x$  melalui resistansi  $R_x$ . Pengaturan ini dengan demikian memungkinkan penentuan nilai resistansi yang benar dari pembacaan voltmeter dan mikro-ammeter.

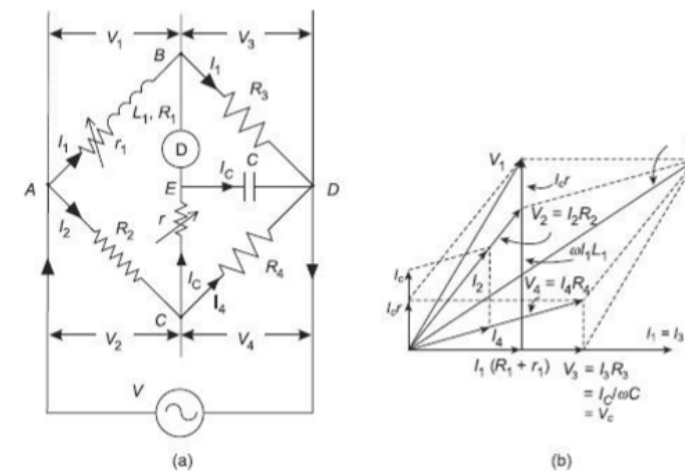
3. Akibat adanya efek elektrostatik, muatan bebas dapat diinduksi dalam rangkaian pengukuran. Aliran dari muatan bebas ini dapat berlaku sebagai arus yang besarnya sebanding dengan arus bernilai rendah yang diukur dalam rangkaian resistansi tinggi. Hal tersebut dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran resistansi

dinyatakan dalam istilah kapasitor yang diketahui standar. Metode ini berlaku untuk pengukuran induktansi yang akurat pada rentang nilai yang luas.

Gambar 5.5 menunjukkan konfigurasi jembatan Anderson dan diagram fasor yang sesuai dalam kondisi seimbang.

$L_1$  induktor yang tidak diketahui dari resistansi efektif  $R_1$  di cabang AB dibandingkan dengan kapasitor C yang diketahui standar pada lengan ED. Jembatan seimbang dengan memvariasikan  $r$ .

Dalam kondisi seimbang, karena tidak ada arus yang mengalir melalui detektor, node B dan E memiliki potensi yang sama.



Gambar 5.5 Jembatan Anderson dalam kondisi seimbang: (a) Konfigurasi (b) Diagram Fasor

Seperti ditunjukkan dalam diagram fasor pada Gambar 5.5 (b),  $I_1$  dan  $V_3 = I_1R_3$  berada dalam fase yang sama di sepanjang sumbu horizontal. Karena dalam kondisi keseimbangan, tegangan jatuh melintasi lengan BD dan ED adalah sama,  $V_3 = I_1R_3 = I_C$  dengan

$$L_1 = \frac{R_2 R_3 C_4}{1 + \omega^2 R_4^2 C_4^2} \quad (5.15)$$

dan

$$R_1 = \frac{R_2 R_3 R_4 \omega^2 C_4^2}{1 + \omega^2 R_4^2 C_4^2} \quad (5.16)$$

Faktor Q induktor dalam hal ini dapat dihitung pada kondisi keseimbangan sebagai

$$Q = \frac{\omega L_1}{R_1} = \frac{1}{\omega C_4 R_4} \quad (5.17)$$

Jembatan Hay lebih cocok untuk pengukuran induktor yang tidak diketahui memiliki faktor Q lebih dari 10. Dalam kasus itu, keseimbangan jembatan dapat dicapai dengan memvariasikan  $R_2$  saja, tanpa kehilangan banyak keakuratan.

Dari (5.15) dan (5.17), nilai induktansi yang tidak diketahui dapat ditulis sebagai

$$L_1 = \frac{R_2 R_3 C_4}{1 + (1/Q)^2} \quad (5.18)$$

Untuk induktor dengan  $Q > 10$ , kuantitas  $(1/Q)^2$  akan kurang dari 1/100, dan dengan demikian dapat diabaikan dari penyebut (6,18). Dalam kasus seperti itu, nilai induktor dapat disederhanakan menjadi  $L_1 = R_2 R_3 C_4$ , yang pada dasarnya sama dengan yang diperoleh di jembatan Maxwell.

### 5.3.4 Jembatan Anderson

Metode ini adalah modifikasi dari jembatan induktansi-kapasitansi Maxwell, dimana nilai induktor yang tidak diketahui

tinggi. Selain itu medan elektromagnetik bolak-balik eksternal juga dapat mempengaruhi pengukuran. Oleh karena itu perlu perhatian terhadap efek elektrostatik dan medan elektromagnetik tersebut.

4. Pada pengukuran resistansi sebuah isolator, terkadang memiliki nilai kapasitansi yang cukup besar. Saat menyalakan catu daya dc, arus pengisian yang besar mungkin awalnya mengalir melalui rangkaian, yang secara bertahap berkurang. Arus transien awal ini dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, kecuali jika waktu yang cukup disediakan antara penerapan pasokan tegangan dan membaca pengukuran, sehingga arus pengisian mendapat waktu yang cukup untuk mereda.
5. Hasil pengukuran resistansi tinggi juga dipengaruhi oleh perubahan suhu, kelembaban dan ketidakakuratan tegangan yang diberikan.
6. Tegangan tinggi dengan nilai wajar digunakan untuk pengukuran resistansi tinggi untuk menaikkan arus ke nilai tertentu untuk diukur, yang sebaliknya sangat rendah. Jadi, galvanometer sensitif dan mikro-ammeters terkait perlu dilindungi dengan baik terhadap tegangan tinggi tersebut.

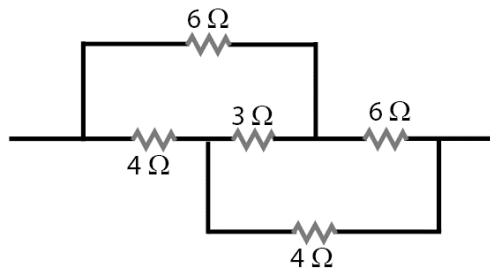
Metode yang dapat digunakan dalam mengukur resistansi tinggi salah satunya dengan Meggar.

## KESIMPULAN

1. Resistor digunakan dalam banyak aplikasi dalam rangkaian listrik. Sifat resistansi memainkan peran penting dalam menentukan spesifikasi kinerja untuk berbagai elemen rangkaian termasuk kumparan, belitan, isolasi, dan lain sebagainya.
2. Dalam sudut pandang pengukuran, resistansi dapat dibedakan menjadi resistansi rendah (*low resistance*), resistansi sedang (*medium resistance*) dan resistansi tinggi (*high resistance*)
3. Pengukuran resistansi rendah, contohnya metode ohmmeter, metode voltmeter-ampere-meter, dan metode jembatan wheatstone
4. Pengukuran resistansi sedang, contohnya metode voltmeter-ampere-meter, metode jembatan ganda kelvin, dan metode potensiometer.

## LATIHAN SOAL

1. Dalam sudut pandang pengukuran, resistansi dapat dibedakan menjadi 3 resistansi, sebutkan dan jelaskan masing-masing!
2. Jelaskan 3 metode dalam pengukuran hambatan listrik!
3. Jika diketahui V yang mengalir dari ujung kiri ke ujung kanan adalah 48 volt. Kuat arus yang melalui rangkaian di bawah ini.



cabang  $V_2$  akan berada dalam fase yang sama seperti yang ditunjukkan dalam diagram fasor pada Gambar 5.4 (b). Arus  $I_2$  yang sama mengalir melalui lengan CD dan menghasilkan penurunan tegangan  $I_2 R_4$  melintasi resistansi 4. Penurunan tegangan resistif  $I_2 R_4$  ini, jelas berada pada fase yang sama dengan  $I_2$ . Penurunan tegangan kapasitif  $I_2 / \omega C_4$  dalam kapasitansi  $C_4$  yang ada di lengan AC yang sama, namun mengabaikan arus  $I_2$  sebesar  $90^\circ$ . Penjumlahan fasor dari dua tegangan seri yang menurun pada R4 dan C4 akan menghasilkan penurunan tegangan total  $V_4$  pada lengan CD. Akhirnya, penjumlahan fasor dari  $V_1$  dan  $V_2$  (atau  $V_2$  dan  $V_4$ ) menghasilkan tegangan suplai V.

Seimbang,

$$\frac{R_1 + j\omega L_1}{R_3} = \frac{R_2}{\left(R_4 - \frac{j}{\omega C_4}\right)}$$

atau,

$$R_1 R_4 + \frac{L_1}{C_4} + j\omega L_1 R_4 - \frac{j R_1}{\omega C_4} = R_2 R_3$$

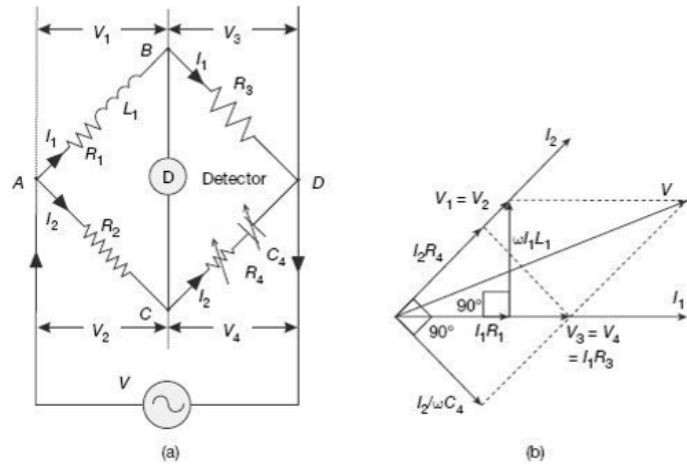
Menyamakan bagian nyata dan imajiner, kita miliki

$$R_1 R_4 + \frac{L_1}{C_4} = R_2 R_3 \quad (5.13)$$

dan

$$\omega L_1 R_4 = \frac{R_1}{\omega C_4} \quad (5.14)$$

Memecahkan Persamaan (6.13) dan (6.14) kami memiliki jumlah yang tidak diketahui sebagai



Gambar 5.4 Jembatan Hay dalam kondisi seimbang: (a) Konfigurasi, (b) diagram Fasor

Seperti yang ditunjukkan dalam diagram fasor pada Gambar 5.4 (b),  $V_3$  dan  $V_4$  adalah sama, keduanya tumpang tindih baik dalam besarnya dan fase pada gambar disepanjang sumbu horizontal. Lengan BD menjadi murni resistif, arus  $I_1$  melalui lengan ini akan berada pada fase yang sama dengan penurunan tegangan  $V_3 = I_1 R_3$  melintanginya.  $I_1$  arus yang sama, saat melewati resistansi  $R_1$  di lengan AB, menghasilkan penurunan tegangan  $I_1 R_1$  yang sekali lagi, dalam fase yang sama dengan  $I_1$ . Penurunan tegangan total  $V_1$  melintasi lengan AB diperoleh dengan menambahkan dua quadrature fasor  $I_1 R_1$  dan  $I_1 L_1$  mewakili penurunan tegangan resistif dan induktif dalam cabang AB yang sama. Karena dalam kondisi keseimbangan, tegangan turun pada lengan AB dan AC adalah sama, yaitu, ( $V_1 = V_2$ ), dua tegangan  $V_1$  dan  $V_2$  tumpang tindih baik dalam besarnya dan fase. Cabang AC yang murni resistif, arus cabang  $I_2$  dan tegangan

4. Sebutkan beberapa kesulitan yang dihadapi dalam melakukan pengukuran resistansi tinggi!
5. Dalam pengukuran resistansi tinggi dikenal metode megger, bagaimana cara kerja metode tersebut!

# BAB V

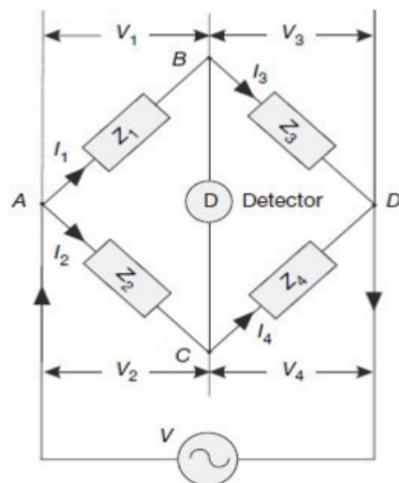
## JEMBATAN AC

### 5.1. PENDAHULUAN

Jembatan arus bolak-balik adalah instrumen yang paling populer, nyaman dan akurat untuk pengukuran induktansi yang tidak diketahui, kapasitansi dan beberapa pengukuran terkait lainnya. Dalam bentuknya yang paling sederhana jembatan AC dapat dianggap berasal dari jembatan Wheatstone DC konvensional. Dalam bentuk dasarnya jembatan AC terdiri dari empat lengan, satu daya bolak-balik, dan detektor keseimbangan.

### 5.2. PERSAMAAN UMUM

Jembatan AC dalam bentuk umumnya ditunjukkan pada Gambar 5.1, dengan keempat lengan diwakili oleh empat impedansi yang tidak ditentukan  $Z_1, Z_2, Z_3$  dan  $Z_4$ .



Gambar 5.1 Konfigurasi umum jembatan 4 lengan

mendapatkan keseimbangan sambil mengukur induktor  $Q$  rendah.

### 5.3.3 Jembatan Hay

Jembatan Hay adalah modifikasi dari jembatan Maxwell. Metode pengukuran ini sangat cocok untuk induktor  $Q$  tinggi.

Konfigurasi jembatan Hay dan diagram fasor terkait dalam keadaan seimbang ditunjukkan pada Gambar 5.4.

Induktor  $L_1$  yang tidak diketahui dari resistensi efektif  $R_1$  di cabang AB dibandingkan dengan  $C_4$  kapasitor variabel standar yang diketahui pada lengan CD. Jembatan ini menggunakan seri resistensi  $R_4$  dengan kapasitor standar  $C_4$  (tidak seperti pada jembatan Maxwell di mana  $R_4$  paralel dengan  $C_4$ ). Resistensi  $R_2$  dan  $R_3$  lainnya diketahui sebagai resistor tanpa induktif. Jembatan seimbang dengan memvariasikan  $C_4$  dan  $R_4$ .

Dalam kondisi seimbang, karena tidak ada arus yang mengalir melalui detektor, node B dan D memiliki potensi yang sama, tegangan turun melintasi lengan BD dan CD sama ( $V_3 = V_4$ ); sama halnya dengan tegangan turun pada lengan AB dan AC sama ( $V_1 = V_2$ ).

dengan faktor  $Q$  tinggi, karena dalam kasus itu, nilai  $R_4$  yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan menjadi sangat praktis.

#### Keuntungan dari Jembatan Maxwell

1. Persamaan keseimbangan (5.11) saling independen, sehingga dua variabel  $C_4$  dan  $R_4$  dapat bervariasi secara independen.
2. Persamaan keseimbangan akhir tidak tergantung pada frekuensi.
3. Jumlah yang tidak diketahui dapat dilambangkan dengan ekspresi sederhana yang melibatkan jumlah yang diketahui.
4. Persamaan keseimbangan tidak tergantung pada kerugian yang terkait dengan induktor.
5. Berbagai induktansi pada frekuensi daya dan audio dapat diukur.

#### Kerugian dari Jembatan Maxwell

1. Operasi pada jembatan memerlukan kapasitor variabel standar, yang bisa sangat mahal jika diminta akurasi tinggi. Dalam kasus seperti itu, kapasitor nilai tetap digunakan dan keseimbangan dicapai dengan memvariasikan  $R_4$  dan  $R_2$ .
2. Jembatan ini terbatas pada pengukuran induktor  $Q$  rendah ( $1 < Q < 10$ ).
3. Jembatan Maxwell juga tidak cocok untuk kumparan dengan nilai  $Q$  yang sangat rendah (misal,  $Q < 1$ ). Induktor  $Q$  yang rendah dapat ditemukan pada resistor induktif dan gulungan RF. Jembatan Maxwell sulit dan sulit untuk

Keseimbangan di jembatan diamankan dengan menyesuaikan satu atau lebih lengan jembatan. Keseimbangan ditunjukkan oleh respons nol pada detektor. Pada keseimbangan, tidak ada arus yang mengalir melalui detektor artinya tidak ada perbedaan potensial di seluruh detektor atau dengan kata lain, potensi pada titik B dan C adalah sama. Ini akan tercapai jika tegangan turun dari A ke B sama dengan penurunan tegangan dari A ke C baik dalam besarnya maupun fase.

Jadi, kita dapat menulis dalam jumlah yang kompleks:

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2$$

atau,

$$\bar{I}_1 \bar{Z}_1 = \bar{I}_2 \bar{Z}_2 \quad (5.1)$$

Juga seimbang, karena tidak ada arus yang mengalir melalui detektor,

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_3 = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3} \quad (5.2)$$

dan,

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_4 = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_4} \quad (5.3)$$

Menggabungkan Persamaan (5.2) dan (5.3) ke Persamaan. (5.1),

$$\frac{\bar{V}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3} \bar{Z}_1 = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_4} \bar{Z}_2$$

atau,

$$\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_3$$

atau,

$$\bar{Z}_1 \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_3 \quad (5.4)$$

atau,

$$\frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_3} = \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_4} \quad (5.5)$$

$$\bar{Y}_1 \bar{Y}_4 = \bar{Y}_2 \bar{Y}_3 \quad (5.6)$$

$$Z_1 \angle \theta_1 \times Z_4 \angle \theta_4 = Z_2 \angle \theta_2 \times Z_3 \angle \theta_3$$

$$Z_1 Z_4 \angle (\theta_1 + \theta_4) = Z_2 Z_3 \angle (\theta_2 + \theta_3) \quad (5.7)$$

Persamaan (5.7) menunjukkan bahwa dua persyaratan harus dipenuhi untuk memenuhi kondisi keseimbangan dalam jembatan

Kondisi pertama adalah bahwa besarnya impedansi harus memenuhi hubungan;

$$\bar{Z}_1 \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_3 \quad (5.8)$$

Kondisi kedua adalah bahwa sudut fase impedansi harus memenuhi hubungan;

$$\angle (\theta_1 + \theta_4) = \angle (\theta_2 + \theta_3) \quad (5.9)$$

### Contoh 5.1

Pada rangkaian jembatan AC yang ditunjukkan pada Gambar 5.1, tegangan suplai adalah 20 V pada 500 Hz. lengan AB adalah 0,25 m $\mu$  kapasitansi murni; lengan BD adalah 400 resistansi tahanan murni dan lengan AC memiliki resistansi 120 secara paralel dengan kapasitor 0,15 m $\mu$ . Hitunglah resistansi dan

atau Faktor-Q dari induktor yang hilang digunakan untuk menunjukkan seberapa dekat induktor yang sebenarnya berperilaku sebagai induktor yang ideal. Faktor-Q dari sebuah induktor didefinisikan sebagai rasio reaktansi induktif terhadap resistansi pada frekuensi tertentu. Q-faktor adalah ukuran efisiensi induktor. Semakin tinggi nilai Q-faktor, semakin dekat ia mendekati perilaku ideal, kehilangan induktor lebih sedikit. Induktor yang ideal akan memiliki Q tak terbatas di semua frekuensi.

Faktor-Q dari induktor diberikan oleh rumus  $Q = \frac{\omega L}{R}$ , di mana  $R$  adalah resistansi internalnya  $R$  (resistansi seri) dan  $\omega L$  adalah reaktansinya yang induktif pada frekuensi  $\omega$ .

Faktor-Q dari sebuah induktor dapat ditingkatkan baik dengan meningkatkan nilai induktansinya (dengan menggunakan inti feromagnetik yang baik) atau dengan mengurangi resistensi belitannya (dengan menggunakan bahan konduktor berkualitas baik, dalam kasus-kasus khusus mungkin juga merupakan konduktor super).

Di Jembatan Induktansi-Kapasitansi Maxwell, faktor-Q dari induktor yang sedang diukur dapat ditemukan pada kondisi keseimbangan menjadi  $Q = \frac{\omega L_1}{R_1}$  atau,

$$Q = \frac{\omega C_4 R_2 R_3}{R_2 \times \frac{R_3}{R_4}} = \omega C_4 R_4 \quad (5.12)$$

Persamaan di atas (5.12) untuk faktor Q induktor menunjukkan bahwa jembatan ini tidak cocok untuk pengukuran nilai induktor



atau,

$$R_1 = R_2 \times \frac{R_3}{R_4}$$

dan juga,

$$j\omega L_1 R_4 = j\omega C_4 R_2 R_3 R_4$$

atau,

$$L_1 = C_4 R_2 R_3$$

Jadi, jumlah yang tidak diketahui adalah

$$L_1 = C_4 R_2 R_3 \text{ dan } R_1 = R_2 \times \frac{R_3}{R_4} \quad (5.11)$$

Sekali lagi, persamaan akhir (5.11) menunjukkan bahwa nilai  $L_1$  dan  $R_1$  tidak bergantung pada frekuensi suplai. Dengan demikian, konfigurasi jembatan ini tahan terhadap variasi frekuensi dan bahkan distorsi harmonik pada catu daya.

Pada Induktansi Jembatan Maxwell dan Jembatan Induktansi Kapasitansi, Induktor  $L_1$  yang tidak diketahui selalu dikaitkan dengan resistensi  $R_1$ . Resistansi seri ini telah dimasukkan untuk mewakili kerugian yang terjadi pada koil induktor. Induktor yang ideal tidak akan rugi terlepas dari jumlah arus yang mengalir melewatinya. Namun, setiap induktor nyata akan memiliki beberapa hambatan non-nol yang terkait dengannya karena resistensi kawat logam yang digunakan untuk membentuk belitan induktor. Resistansi seri ini menyebabkan pembentukan panas karena kehilangan daya. Dalam kasus seperti itu, Faktor Kualitas

induktansi atau kapasitansi dari lengan CD dengan mempertimbangkannya sebagai rangkaian seri.

Solusi Impedansi lengan AB adalah

$$Z_1 = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 0.25 \times 10^{-6}} = 1273 \Omega$$

karena murni kapasitif, dalam notasi kompleks,  $Z_1 = 1273 \angle -90^\circ \Omega$

Impedansi lengan BD adalah  $Z_3 = 400 \Omega$

Karena itu murni resistif, dalam notasi kompleks,  $Z_3 = 400 \angle 0^\circ \Omega$

Impedansi lengan AC yang mengandung resistansi  $120 \Omega$  secara paralel dengan kapasitor  $0,15 \mu\text{F}$  adalah

$$\begin{aligned} \bar{Z}_2 &= \frac{R_2}{1 + j2\pi f C_2 R_2} = \frac{R_2}{1 + j(2\pi \times 500 \times 0.15 \times 10^{-6} \times 120)} \\ &= 119.8 \angle -3.2^\circ \Omega \end{aligned}$$

Untuk keseimbangan,  $\bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \bar{Z}_3$

impedansi pada lengan CD yang diperlukan untuk keseimbangan

$$\text{adalah } \bar{Z}_4 = \frac{\bar{Z}_2 \bar{Z}_3}{\bar{Z}_1}$$

atau,

$$\bar{Z}_4 = \frac{119.88 \times 400}{1273} \angle (-3.2^\circ + 0^\circ + 90^\circ) = 37.65 \angle 86.8^\circ$$

Sudut positif dari impedansi menunjukkan bahwa cabang terdiri dari serangkaian kombinasi hambatan dan induktansi.

Resistansi dari cabang yang tidak diketahui,  $R_4 = 37.65 \times \cos(86.8^\circ) = 2.1 \Omega$

Reaktansi induktif dari cabang yang tidak diketahui

$$X_4 = 37.65 \times \sin(86.8^\circ) = 37.59 \Omega$$

induktansi dari cabang yang tidak diketahui,  $L_4 = \frac{37.59}{2\pi \times 500} H = 11.97 \text{ mH}$

### 5.3. PENGUKURAN INDUKTANSI DALAM

#### 5.3.1 Jembatan Maxwell

Jembatan ini digunakan untuk mengukur nilai induktansi yang tidak diketahui dengan membandingkannya dengan induktansi standar variabel. Konfigurasi jembatan dan diagram fasor dalam kondisi seimbang ditunjukkan pada Gambar 5.2.

$L_1$  induktor yang tidak diketahui dari resistansi  $R_1$  di cabang AB dibandingkan dengan induktor  $L_2$  yang dikenal standar dari resistansi  $R_2$  pada lengan AC.  $L_2$  induktor memiliki urutan yang sama dengan  $L_1$  induktor yang tidak diketahui. Resistansi  $R_1$ ,  $R_2$ , dll., Termasuk resistansi kontak dan resistansi timbal di berbagai lengan. Cabang BD dan CD masing-masing berisi resistor *noninductive*  $R_3$  dan  $R_4$ .

Jembatan seimbang dengan memvariasikan  $L_2$  dan salah satu resistor  $R_3$  atau  $R_4$ . Atau,  $R_3$  dan  $R_4$  dapat dijaga konstan, dan resistansi salah satu dari dua lengan lainnya dapat bervariasi dengan menghubungkan resistor tambahan.

Dalam kondisi seimbang, tidak ada arus yang mengalir melalui detektor. Dalam kondisi seperti itu, arus di lengan AB dan BD sama ( $I_1$ ). Demikian pula, arus di lengan AC dan CD sama ( $I_2$ ). Dalam kondisi seimbang, karena node B dan D berada pada potensial yang sama, tegangan jatuh di lengan BD dan CD sama

besarnya dan fase. Lengan BD murni bersifat resistif, arus  $I_1$  melalui lengan ini akan berada di fase yang sama dengan drop tegangan  $V_3$  di atasnya. Demikian pula, drop tegangan  $V_4$  melintasi lengan CD, arus  $I_R$  melalui resistansi  $R_4$  di cabang yang sama, dan penurunan tegangan resistif yang dihasilkan  $I_R R_4$  semuanya dalam fase yang sama garis horizontal pada Gambar 5.3 (b).  $I_R$  arus resistif ketika ditambahkan dengan  $I_C$  arus kapasitif quadrature, menghasilkan arus  $I_2$  utama yang mengalir dalam CD arm.  $I_2$  saat ini saat mengalir melalui resistansi  $R_2$  di AC lengan, menghasilkan penurunan tegangan  $V_2 = I_2 R_2$ , yang berada di fase yang sama dengan  $I_2$ . Dalam kondisi seimbang, tegangan jatuh pada lengan AB dan AC sama, yaitu,  $V_1 = V_2$ . Penurunan tegangan di lengan AB sebenarnya adalah penjumlahan fasor penurunan tegangan IIR1 melintasi resistansi  $R_1$  dan penurunan tegangan quadrature  $I_1 L_1$  melintasi induktor  $L_1$  yang tidak diketahui. Akhirnya, penjumlahan fasor  $V_1$  dan  $V_3$  (atau  $V_2$  dan  $V_4$ ) menghasilkan tegangan suplai  $V$ .

Seimbang,

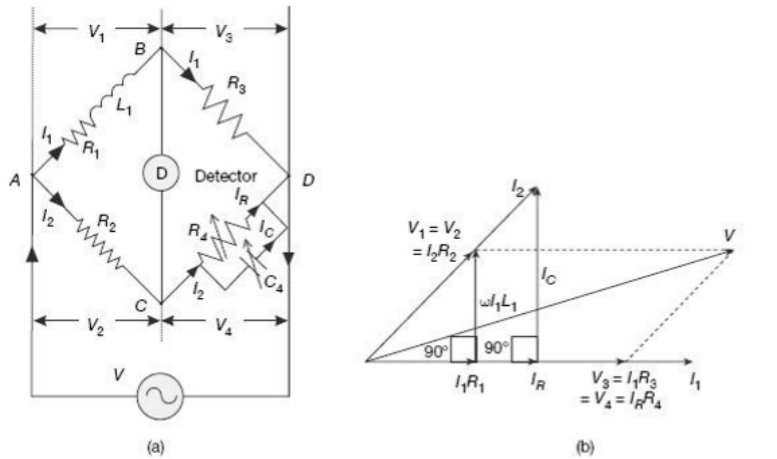
$$\frac{R_1 + j\omega L_1}{R_3} = \frac{R_2}{\left(\frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}\right)}$$

atau,

$$R_1 R_4 + j\omega L_1 R_4 = R_2 R_3 + j\omega C_4 R_2 R_3 R_4$$

Menyamakan antara bagian nyata dan imajiner,

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$



Gambar 5.3 Jembatan induktansi-kapasitansi Maxwell dalam kondisi seimbang: (a) Konfigurasi (b) Diagram fasor

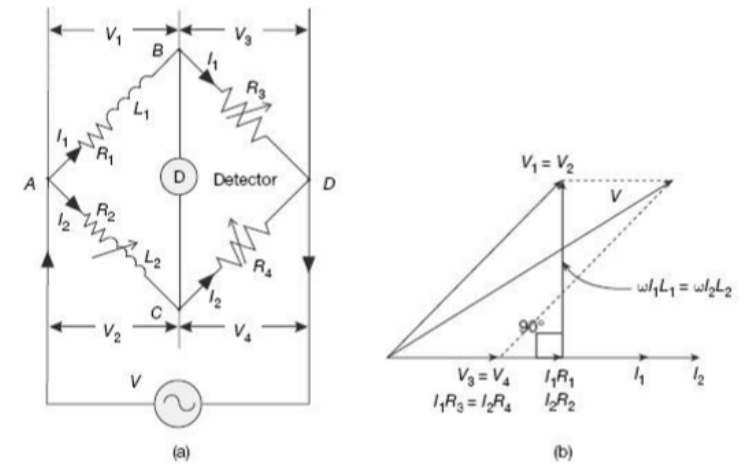
Induktor  $L_1$  yang tidak diketahui dari resistansi efektif  $R_1$  di cabang AB dibandingkan dengan kapasitor variabel  $C_4$  yang diketahui standar pada lengan CD.

Resistansi  $R_2$ ,  $R_3$ , dan  $R_4$  lainnya dikenal sebagai resistor non-induktif. Jembatan seimbang dengan memvariasikan  $C_4$  dan  $R_4$ , memberikan pengaturan penyesuaian independen.

Dalam kondisi seimbang, tidak ada arus yang mengalir melalui detektor. Dalam kondisi seperti itu, arus di lengan AB dan BD sama ( $I_1$ ). Demikian pula, arus di lengan AC dan CD sama ( $I_2$ ). Dalam kondisi seimbang, karena node B dan D berada pada potensial yang sama, tegangan jatuh di lengan BD dan CD sama ( $V_3 = V_4$ ); sama halnya, jatuh tegangan pada lengan AB dan AC sama ( $V_1 = V_2$ ).

Seperti yang ditunjukkan dalam diagram fasor pada Gambar 5.3 (b),  $V_3$  dan  $V_4$  adalah sama, mereka tumpang tindih baik dalam

( $V_3 = V_4$ ); sama halnya, penurunan tegangan pada lengan AB dan AC sama ( $V_1 = V_2$ ).



Gambar 5.2 Jembatan induktansi Maxwell dalam kondisi seimbang: (a) Konfigurasi (b) Diagram Fasor

Seperti yang ditunjukkan diagram fasor pada Gambar 5.2 (b),  $V_3$  dan  $V_4$  sama, keduanya saling tumpang tindih. Lengan BD dan CD bersifat murni resistif, arus melalui lengan-lengan ini akan berada pada fase yang sama dengan tegangan turun di kedua cabang masing-masing. Dengan demikian, arus  $I_1$  dan  $I_2$  akan menjadi linier dengan fasa  $V_3$  dan  $V_4$ . Arus  $I_1$  yang sama mengalir melalui cabang AB juga, sehingga penurunan tegangan  $I_1R_1$  tetap dalam fase yang sama dengan  $I_1$ . Tegangan jatuh  $I_1L_1$  di induktor  $L_1$  akan keluar  $90^\circ$  dari fase dengan  $I_1R_1$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.2 (b). Penjumlahan fasor dari dua penurunan tegangan  $I_1R_1$  dan  $I_1L_1$  ini akan memberikan penurunan tegangan  $V_1$  melintasi lengan AB. Pada kondisi seimbang, karena tegangan melintasi dua cabang AB dan AC sama, maka dua tegangan turun

$V_1$  dan  $V_2$  sama dan berada dalam fase yang sama. Akhirnya, penjumlahan fasor  $V_1$  dan  $V_3$  (atau  $V_2$  dan  $V_4$ ) menghasilkan tegangan suplai  $V$ .

Seimbang,

$$\frac{R_1 + j\omega L_1}{R_3} = \frac{R_2 + j\omega L_2}{R_4}$$

atau,

$$R_1 R_4 + j\omega L_1 R_4 = R_2 R_3 + j\omega L_2 R_3$$

Menyamakan antara bagian nyata dan imajiner,

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

atau,

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

dan juga,

$$j\omega L_1 R_4 = j\omega L_2 R_3$$

atau,

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

jadi,

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{L_1}{L_2}$$

Jumlah yang tidak diketahui karenanya dapat dihitung sebagai

$$L_1 = L_2 \times \frac{R_3}{R_4} \text{ dan } R_1 = R_2 \times \frac{R_3}{R_4} \quad (5.10)$$

Harus diperhatikan bahwa induktor  $L_1$  dan  $L_2$  harus ditempatkan pada jarak dari masing-masing induktor untuk menghindari efek induktansi timbal balik.

Pada penyelesaian akhir (6.10) menunjukkan bahwa nilai  $L_1$  dan  $R_1$  tidak tergantung pada frekuensi suplai. Dengan demikian, konfigurasi jembatan ini kebal terhadap variasi frekuensi dan bahkan distorsi harmonik pada catu daya.

### 5.3.2 Jembatan Maxwell Kapasitansi-Induktansi

Di jembatan Maxwell ini, induktansi yang tidak diketahui diukur dengan perbandingan dengan kapasitansi variabel standar. Jauh lebih mudah untuk mendapatkan nilai standar kapasitor variabel dengan tingkat akurasi yang bisa diterima. Namun, ini tidak terjadi dengan cara menemukan induktor variabel nilai standar yang akurat dan stabil seperti yang diperlukan dalam jembatan dasar Maxwell yang dijelaskan dalam Bagian 5.3.1.

Konfigurasi jembatan induktansi-kapasitansi Maxwell dan diagram fasor terkait pada kondisi seimbang ditunjukkan pada Gambar 5.3.