

3100098010158

Anotasi
2333

**SIMULASI PERHITUNGAN RUGI-RUGI ENERGI LISTRIK
AKIBAT PENURUNAN KUALITAS ENERGI LISTRIK
DI PT. SEMEN GRESIK (PERSERO) TUBAN I**

TUGAS AKHIR

Oleh :

IGAN WARDIANA YASA

NRP. 2291 100 093

RSE
621.31
Yasa
S-1

1997



14-Nop-97
ti
7985

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1997**

**SIMULASI PERHITUNGAN RUGI-RUGI ENERGI LISTRIK
AKIBAT PENURUNAN KUALITAS ENERGI LISTRIK
DI PT. SEMEN GRESIK (PERSERO) TUBAN I**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro**

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Ontoseno Penangsang

NIP. 130 520 748

SURABAYA

JULI, 1997

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan syukur ke hadapan Sang Hyang Widhi Wasa, yang telah memberikan anugerah-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul :

SIMULASI PERHITUNGAN RUGI-RUGI ENERGI LISTRIK

AKIBAT PENURUNAN KUALITAS ENERGI LISTRIK

DI PT. SEMEN GRESIK (PERSERO) TUBAN I

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi strata S1 pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tiada gading yang tak retak. Sebagai manusia biasa, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan di sana-sini karena keterbatasan dari penulis. Penulis berharap adanya kritikan dan masukan untuk kesempurnaan dari penulisan tugas akhir ini.

Akhir kata penulis berharap semoga tugas akhir ini mempunyai manfaat bagi semua pembacanya, khususnya bagi penulis sendiri.

Surabaya, Agustus 1997

Penulis

ABSTRAKSI

Permasalahan kualitas energi listrik semakin mendapat perhatian akhir-akhir ini, baik dari sisi pelanggan maupun dari sisi pengelola sistem kelistrikan.

Salah satu aspek dari penurunan kualitas energi listrik adalah efisiensi energi, dengan demikian kualitas energi listrik merupakan salah satu parameter yang perlu dipertimbangkan dalam usaha penghematan energi.

Penurunan kualitas energi listrik dalam keadaan "steady-state" yang berlangsung dalam waktu cukup lama, dapat mempengaruhi pemakaian energi listrik pada komponen utama beban industri. Dengan simulasi peningkatan kualitas energi listrik dapat diprakirakan penghematan energi yang diperoleh. Metode simulasi yang digunakan adalah analisis aliran daya dengan memperhitungkan karakteristik pemakaian energi dari komponen-komponen utamanya.

Studi kasus dilakukan pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban. Hasil simulasi menunjukkan dengan adanya peningkatan kualitas energi listrik, dapat diperoleh penghematan pemakaian energi yang berarti dan pada akhirnya dapat menurunkan biaya produksi.

DAFTAR ISI

JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAKSI	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Pembatasan Masalah	2
1.4. Sistematika Pembahasan	3
1.5. Relevansi	4
BAB II. TEORI MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DAN TRANSFORMATOR DAYA	5
2.1. Motor Induksi Tiga Phasa	5
2.1.1. Konstruksi Motor Induksi	5
2.1.2. Konsep Dasar Motor Induksi	7
2.1.3. Rangkaian Ekuivalen Dari Motor Induksi	9
2.1.3.1. Model Rangkaian Dari Rotor	10
2.1.3.2. Rangkaian Ekuivalen Terakhir	12
2.1.4. Daya Dan Kopel Dalam Motor Induksi	14
2.2. Transformator Daya	17
2.2.1. Rangkaian Ekuivalen Aproksimasi Transformator Daya	19
2.2.2. Rugi Tembaga	20

2.2.3. Rugi Inti (Rugi Besi)	21
2.2.4. Hubungan Transformator	23
2.2.5. On Load Tap Changer Transformer	23
BAB III. FAKTOR-FAKTOR KUALITAS ENERGI LISTRIK	24
3.1. Masalah Netral Dan Grounding	25
3.2. Masalah Pemadaman	26
3.3. Masalah Sag, Surge, Noise Dan Tegangan Transien	26
3.4. Masalah Variasi Frekwensi, RFI, dan ESD	29
3.5. Faktor Daya	31
3.6. Turun Naiknya Tegangan	36
3.6.1. Pengaruh Turun Naiknya Tegangan Pada Transformator	38
3.6.1.1. Rugi Tembaga	38
3.6.1.1.1. On Load Tap Changer Transformer	38
3.6.1.1.2. Off Load Tap Changer Transformer	39
3.6.1.2. Rugi Inti Besi	40
3.6.2. Rugi Daya Pada Konduktor	43
3.6.3. Rugi Daya Pada Motor Induksi	44
3.7. Distorsi Harmonik	46
3.7.1. Pengaruh Harmonik Pada Transformator	47
3.7.2. Pengaruh Harmonik Pada Mesin Listrik	49
3.7.3. Pengaruh Harmonik Pada Kapasitor	53
3.7.4. Pengaruh Harmonik Terhadap Peralatan Pemutus	54
3.7.5. Pengaruh Harmonik Terhadap Nilai Pengaman	55
3.8. Ketidakseimbangan Tegangan	55
3.8.1. Rugi Daya Pada Transformator	56
3.8.2. Rugi Daya Pada Motor Induksi	59

BAB IV. SIMULASI PENINGKATAN KUALITAS ENERGI LISTRIK

DI PT. SEMEN GRESIK (PERSERO) TUBAN I

- 4.1. Sistem Kelistrikan di PT. Semen Gresik (Persero) Tuban I
- 4.2. Perbaikan Faktor Daya
- 4.3. Penurunan Tegangan
- 4.4. Distorsi Harmonik
- 4.5. Ketidakseimbangan Tegangan
- 4.6. Hasil Simulasi Pemakaian Energi Listrik
 - 4.6.1. Perbaikan Faktor Daya
 - 4.6.2. Perbaikan Tegangan
 - 4.6.3. Perbaikan Faktor Daya Dan Tegangan
 - 4.6.4. Distorsi Harmonik

BAB V. PENUTUP

- 5.1. Kesimpulan
- 5.2. Saran-Saran

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

No.	Hal.
2.1. Bentuk stator motor induksi	6
2.2. Bentuk rotor dari motor induksi jenis belit (wound rotor)	6
2.3. Bentuk rotor dari motor induksi jenis sangkar bajing (squirrel cage)	7
2.4. Terjadinya kopel induksi pada motor induksi	8
2.5. Model trafo dari motor induksi	10
2.6. Model rangkaian rotor dari motor induksi	11
2.7. Model rangkaian rotor dengan semua pengaruh slip frekwensi dituangkan pada rotor	12
2.8. Rangkaian ekivalen per phasa dari motor induksi	14
2.9. Diagram aliran daya dari motor induksi	15
2.10. Rangkaian ekivalen transformator	18
2.11. Rangkaian ekivalen aproksimasi transformator daya	20
2.12. Rangkaian transformator "on load tap changer"	23
3.1. Bentuk gelombang outage (pemadaman)	26
3.2. Bentuk gelombang sag dan surge	27
3.3. Tegangan transien akibat sambaran petir	28
3.4. Efek dari switching kapasitor	29
3.5. Bentuk gelombang jika terjadi masalah pada frekwensi	30
3.6. Pemasangan kapasitor shunt pada jaringan tenaga listrik	34
3.7. Pengaruh kompensasi daya reaktif terhadap kemampuan penyaluran daya	35
3.8. Peningkatan rugi-rugi daya akibat turun naiknya tegangan pada transformator 10 MVA, 20kV/6,3kV	42
3.9. Peningkatan rugi-rugi daya akibat turun naiknya tegangan pada motor induksi 1072 kW	45

3.10. Peningkatan rugi-rugi daya akibat distorsi harmonik pada transformator 10 MVA, 20kV/6,3kV	49
3.11. Peningkatan rugi stator dan rugi total akibat distorsi harmonis pada motor induksi 1072kW	53
3.12. Vektor tegangan titik bintang	57
3.13. Pertambahan rugi daya akibat ketidakseimbangan tegangan pada transformator 10MVA, 20kV/6,3kV	59
3.14. Peningkatan rugi daya akibat ketidakseimbangan tegangan pada motor induksi 1072kW	61
4.1. Single line diagram dari sistem kelistrikan pada pabrik Semen Tuban I	64
4.2. Kurva beban harian tanggal 5 Desember 1995	66
4.3. Perbandingan tegangan pada bus-bus Sub Station karena perbaikan faktor daya	69
4.4. Perbandingan faktor daya pada bus-bus Sub Station karena perbaikan faktor daya	69
4.5. Penurunan rugi daya di saluran karena perbaikan faktor daya	70
4.6. Released capacity yang diperoleh dari hasil simulasi	73
4.7. Penghematan energi yang diperoleh dari hasil simulasi	74
4.8. Perbandingan pemakaian daya untuk perbaikan tegangan	74

DAFTAR TABEL

No.	Hal.
3.1. Perbandingan rugi histeresis dan Eddy current	39
4.1. Data impedansi jaringan	62
4.2. Pembagian beban berdasarkan Electrical Room	64
4.3. Faktor daya pada beberapa industri	67
4.4. Perbandingan rugi daya penyaluran karena perbaikan faktor daya	69
4.5. Daya yang diserap sistem akibat ketidakstabilan tegangan	70
4.6. Kenaikan rugi daya yang diserap sistem akibat distorsi harmonik	72

Bab I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi listrik merupakan bagian yang tak dapat dipisahkan dalam kehidupan modern. Karena itu selalu diharapkan tersedianya energi listrik dalam jumlah dan kualitas yang memadai. Semua konsumen energi listrik menginginkan daya listrik yang diterima dalam kualitas yang baik. Sebab kualitas yang tidak baik dapat menimbulkan kerugian yang tidak sedikit di pihak konsumen. Namun kenyataannya, sering kali energi listrik yang diterima tidak sesuai dengan yang diharapkan. Sehingga rugi-rugi daya menjadi besar yang merupakan pemborosan energi listrik, juga dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan-peralatan listrik yang ada.

Dalam penyaluran energi listrik dari suatu gardu induk hingga mencapai konsumen, biasanya timbul rugi-rugi maupun gangguan yang dapat menurunkan kualitas energi listrik. Sehingga perbaikan kualitas energi listrik diperlukan untuk mengurangi rugi-rugi yang terjadi di pihak konsumen. PLN sendiri selaku penyedia energi listrik, telah berusaha untuk menjaga agar kualitas energi listrik yang dihasilkan tetap baik. Dimana kualitas energi listrik yang baik dapat menghemat energi listrik, yang berarti mengurangi kebutuhan bahan bakar fosil yang selama ini menjadi pilihan utama dalam pembangkitan tenaga listrik.

1.2. Permasalahan

Pada suatu sistem tenaga listrik, jika terjadi penurunan kualitas tenaga listrik, akan menimbulkan penambahan rugi-rugi daya yang diserap oleh sistem tersebut. Dimana penambahan rugi-rugi daya tersebut, baik yang berasal dari beban maupun dari saluran penghantar, akan mempengaruhi pemakaian daya total pada sistem tersebut. Jika hal ini terjadi pada industri, hal tersebut dapat mengakibatkan naiknya biaya produksi suatu barang, yang tentunya akan menurunkan daya saing barang tersebut di pasaran. Dalam upaya menekan kenaikan biaya produksi, kualitas tenaga listrik pada sistem tersebut harus ditingkatkan sehingga akan menurunkan pemakaian daya total sistem tersebut.

1.3. Pembatasan Masalah

Permasalahan kualitas energi listrik dalam keadaan "stady-state" ditentukan oleh beberapa hal antara lain : pemadamam, faktor daya, penurunan dan kenaikan tegangan, distorsi harmonik, dan ketidakseimbangan tegangan¹. Hampir semua peralatan listrik dirancang dengan range/kualitas tegangan kerja tertentu. Gangguan kualitas energi listrik yang terjadi pada setiap bagian dari sistem tenaga listrik yang mencatu peralatan-peralatan tersebut akan mempengaruhi pemakaian energi listriknya.

Pada tugas akhir ini dibahas beberapa faktor dalam kualitas tenaga listrik dalam keadaan steady state dan pengaruhnya terhadap pemakaian daya pada suatu

¹ Susanto,D., Hermawan,B., "Evaluasi Mutu Listrik Pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali", Seminar Nasional Tenaga Listrik di ITB Bandung, 1-4 Pebruari 1993.

peralatan listrik/beban. Faktor-faktor yang dibahas meliputi faktor daya, ketidakstabilan tegangan, distorsi harmonik, dan ketidakseimbangan tegangan. Sedangkan beban yang dianalisa ialah motor induksi dan transformator daya yang merupakan komponen utama pada beban industri.

1.4. Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari 5 bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab I

Penjelasan mengenai latar belakang permasalahan, pembatasan masalah, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab II

Membahas teori motor-motor induksi dan transformator 3 fasa yang merupakan komponen utama pada beban industri.

Bab III

Membahas tentang faktor-faktor kualitas tenaga listrik dalam keadaan steady state, penyebab terjadinya, dan pengaruhnya terhadap pemakaian daya suatu peralatan.

Bab IV

Merupakan analisa dan simulasi pengaruh beberapa faktor kualitas terhadap pemakaian daya dalam sistem secara keseluruhan.

Bab V

Merupakan kesimpulan yang diperoleh dari analisa dan simulasi yang diperoleh dari pembahasan bab IV.

1.4. Relevansi

Studi analisa dan simulasi perhitungan rugi-rugi energi listrik akibat penurunan kualitas energi listrik diharapkan dapat memberikan pengertian kepada pihak konsumen/kalangan industri mengenai pentingnya kualitas energi listrik dalam usaha penghematan energi listrik dan menekan biaya produksi.

Bab II
TEORI MOTOR INDUKSI TIGA PHASA
DAN TRANSFORMATOR DAYA

2.1. Motor Induksi Tiga Phasa

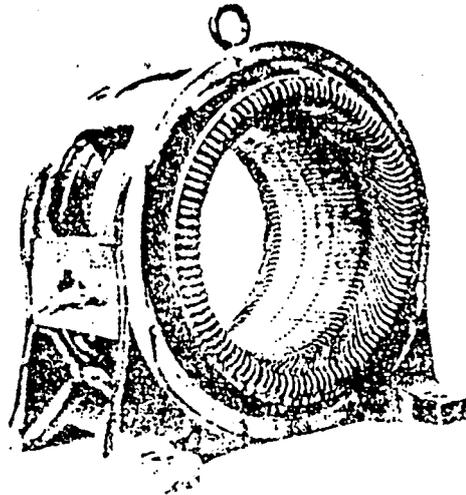
Walaupun mesin ini dapat bekerja sebagai motor ataupun sebagai generator, namun pada umumnya lebih banyak dipakai sebagai motor. Mesin ini disebut mesin induksi karena tegangan rotor yang menghasilkan arus dan medan magnet rotor, diinduksikan dari kumparan stator.

2.1.1. Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi mempunyai stator yang bentuk fisiknya tidak berbeda dengan mesin sinkron, tetapi bentuk rotornya yang berbeda. Rotor motor induksi mempunyai dua bentuk umum :

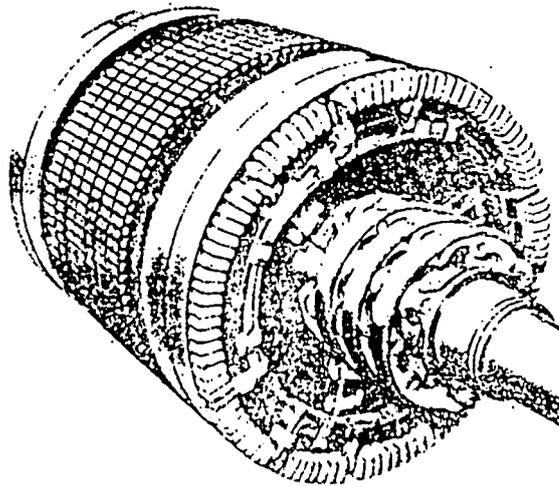
- Squirrel cage rotor (rotor dengan sangkar bajing), kumparan rotor merupakan batang-batang konduktor yang kedua ujungnya dihubungkan oleh cincin sehingga bentuknya merupakan sangkar bajing.
- Wound rotor (rotor belit), dimana kumparan rotor merupakan belitan-belitan konduktor yang dililitkan pada inti rotor. Untuk motor tiga phasa, belitan-belitan rotor dihubungkan bintang dan ujungnya dihubungkan pada cincin-cincin geser yang melekat pada poros. Melalui cincin ini, kumparan rotor dapat dihubungkan dengan tahanan luar maupun dihubungkan.

Bentuk stator dari motor induksi dapat dilihat pada gambar 2.1. Gambar 2.2 menunjukkan motor induksi jenis wound rotor, sedangkan gambar 2.3 menunjukkan rotor induksi jenis sangkar bajing.



Gambar 2.1²

Bentuk stator motor induksi

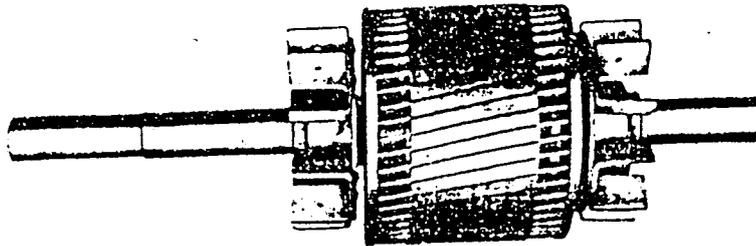


Gambar 2.2³

Bentuk rotor dari motor induksi jenis rotor belit (wound rotor)

² M.L. Garik dan C.C. Whipple, "Alternating Current Machines", Second Edition, April 1961, hal. 116.

³ Ibid, hal. 116.

Gambar 2.3⁴

Bentuk rotor dari motor induksi jenis rotor sangkar bajing (squirrel cage).

2.1.2. Konsep dasar motor induksi

Tegangan tiga fasa dipasang pada stator sehingga mengalir arus tiga fasa yang menghasilkan medan magnet B_s , yang berputar dengan arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Kecepatan dari medan putar adalah :

$$n_{syn} = \frac{120f}{p}$$

dimana f = frekwensi dari sistem,

p = jumlah kutub.

Tegangan induksi pada kumparan rotor diberikan oleh persamaan sebagai berikut :

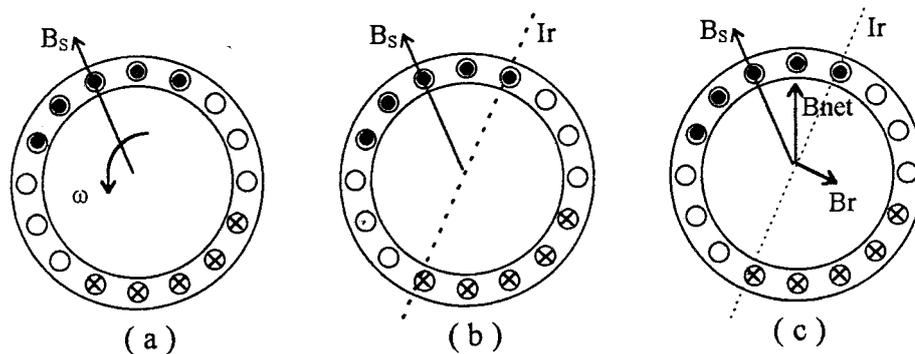
$$e_{ind} = (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot \vec{i}$$

Arah tegangan pada konduktor bagian atas meninggalkan kertas dan pada konduktor bagian bawah menuju ke kertas (gambar 2.4b). Kopel induksi dalam

mesin diberikan oleh : $\tau_{ind} = k \overline{Br} \times \overline{Bs}$

yang mempunyai arah yang berlawanan dengan arah jarum jam.

⁴ Ibid, hal 119.



Gambar 2.4.

Terjadinya kopel induksi pada motor induksi

- (a). Medan Putar B_s menginduksikan tegangan pada kumparan rotor
- (b). Tegangan induksi menghasilkan arus dalam rotor, yang terlambat dengan sudut 90° karena induktansi rotor.
- (c). Arus rotor menghasilkan medan magnet rotor B_r yang terlambat dengan sudut 90° terhadap arus. B_r dan B_{net} menghasilkan kopel yang mempunyai arah berlawanan dengan arah jarum jam.

Kopel ini akan menyebabkan rotor berputar pada arah tersebut. Kecepatan dari motor mempunyai harga batas tertentu. Bila kecepatan rotor dari motor sama dengan kecepatan sinkron, maka batang-batang inti rotor menjadi stasioner relatif terhadap medan magnet dan tidak timbul tegangan induksi. Bila e_{ind} nol, maka arus rotor juga nol, sehingga tidak ada medan magnet pada rotor. Bila tidak ada medan magnet, maka kopel induksi menjadi nol, dan kecepatan rotor menjadi turun karena rugi-rugi gesekan. Oleh karena itu kecepatan motor induksi hanya dapat berputar mendekati kecepatan putaran sinkron, tetapi tidak akan pernah mencapai kecepatan putaran sinkron.

Tegangan induksi pada batang-batang inti rotor dari motor induksi tergantung dari kecepatan rotor relatif terhadap medan magnet. Karena kelakuan dari motor induksi tergantung pada tegangan dan arus rotor, maka arti dari kecepatan relatif tersebut menjadi sangat penting. Ada 2 macam cara untuk menyatakan kecepatan relatif dari rotor dan medan magnet yaitu ;

1. slip speed, yang didefinisikan sebagai berikut :

$$n_{slip} = n_s - n_m$$

2. slip (s) yang dinyatakan dalam besaran persen yaitu :

$$s = \frac{n_{slip}}{n_s} \times 100\%$$

Persamaan ini dapat juga dinyatakan dalam satuan kecepatan sudut ω yaitu :

$$\omega = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \times 100\%$$

Dari persamaan diatas maka kecepatan motor dinyatakan oleh :

$$n_m = (1-s) n_s$$

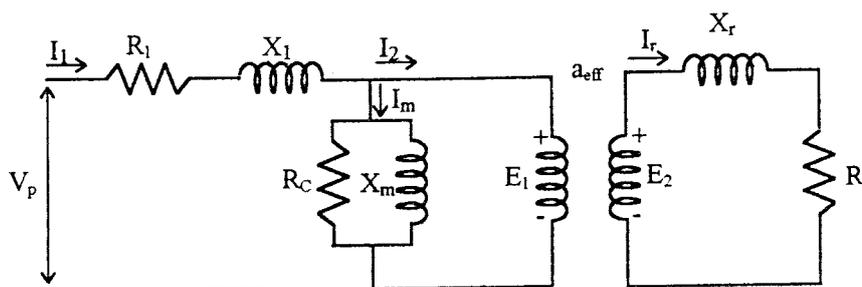
atau $\omega_m = (1-s) \omega_s$

2.1.3. Rangkaian ekuivalen dari motor induksi

Pengoperasian dari motor induksi berdasarkan pada tegangan dan arus dalam rangkaian rotor yang diinduksikan dari rangkaian stator (transformer action). Karena tegangan dan arus dalam rangkaian rotor dari motor induksi pada dasarnya adalah transformer operation sehingga rangkaian ekuivalen dari motor

induksi hampir sama dengan rangkaian ekivalen dari trafo. Hanya saja frekwensi dari belitan sekunder yang berbeda.

Rangkaian ekivalen trafo 1 phasa yang menyatakan operasi dari motor induksi dapat dilihat pada gambar 2.5. Tegangan primer E_1 dalam stator dikopel dengan tegangan E_r oleh trafo ideal dengan ratio belitan a_{eff} . Ratio belitan a_{eff} lebih mudah ditentukan pada motor induksi tipe rotor belit dibandingkan dengan rotor sangkar bajing, karena rotor dari tipe sangkar bajing mempunyai kumparan yang berbentuk batang-batang konduktor. Tegangan E_r yang terjadi dalam rotor menghasilkan arus yang mengalir dalam rangkaian rotor yang lebih pendek dari mesin. Impedansi primer dan arus magnetisasi dari motor induksi hampir sama dengan komponen-komponen yang terdapat dalam rangkaian ekivalen trafo.



Gambar 2.5⁵

Model trafo dari motor induksi

2.1.3.1. Model dari rangkaian rotor

Bila tegangan dipasang pada kumparan stator dari motor induksi, maka tegangan diinduksikan pada kumparan rotor dari mesin. Bila tegangan yang

⁵ M.G. Say, " Alternating Current Machines", London; Elbs and Pitman, 1976, hal 491.

diinduksikan pada kondisi "lock-rotor" adalah E_{r0} , maka tegangan yang dibangkitkan untuk suatu harga slip tertentu adalah $E_r = s E_{r0}$. Dalam rangkaian rotor terdapat resistansi dan reaktansi. Resistansi rotor (R_r) adalah konstan dan tidak tergantung pada slip, sedangkan reaktansi rotor (X_r) tergantung pada slip. Bila induktansi dari rotor adalah L_r , maka :

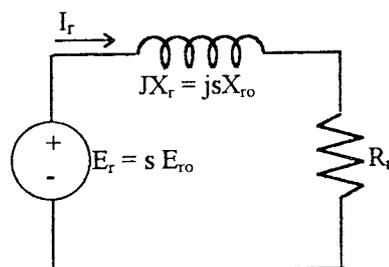
$$X_r = \omega_r L_r = 2 \pi f_r L_r$$

$$X_r = 2\pi s f_0 L_r$$

$$= s (2\pi f_0 L_r)$$

$$= s X_{r0}$$

dengan $X_{r0} = 2\pi f_0 L_r =$ reaktansi dari rotor pada kondisi "block-rotor". Jadi rangkaian ekivalen dari rotor terlihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6⁶

Model dari rangkaian rotor dari motor induksi.

Arus yang mengalir di dalam rotor adalah :

⁶ M.G. Say, op.cit., hal 493.

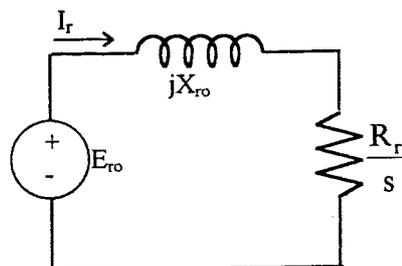
$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R}$$

$$I_R = \frac{s E_{RO}}{R_R + jsX_{RO}} = \frac{E_{RO}}{(R_R / s) + jX_{RO}}$$

Dari persamaan diatas ternyata pengaruh kecepatan rotor pada motor dapat dianggap sebagai akibat perubahan impedansi daya dari sumber tegangan yang konstan E_{RO} . Impedansi dari rotor ekuivalen dalam hal ini adalah ;

$$Z_{req} = \frac{R_R}{s} + j X_{RO}$$

dan rangkaian rotor ekuivalen yang menggunakan konvensi ini terlihat pada gambar 2.7. Dalam rangkaian ekuivalen tersebut, tegangan rotor adalah konstan E_{RO} , dan impedansi rotor Z_{req} mengandung semua pengaruh dari perubahan slip rotor.



Gambar 2.7⁷

Model rangkaian rotor dengan semua pengaruh slip frekwensi
dituangkan pada rotor

2.1.3.2. Rangkaian ekuivalen terakhir

Untuk menghasilkan rangkaian ekuivalen perphasa terakhir dari motor induksi, adalah penting untuk menyatakan bagian rotor dari model pada level

⁷ Ibid, hal. 494.

tegangan stator. Pada trafo biasa, tegangan, arus dan impedansi pada sisi sekunder dapat dinyatakan dengan referensi sisi primer melalui ratio belitan dari trafo.

$$V_p = V_s' = a V_s$$

$$I_p = I_s' = \frac{I_s}{a}$$

dan $Z_s' = a^2 Z_s$

dengan $a = \text{ratio antara belitan primer dengan belitan sekunder} = \frac{N_p}{N_s}$.

Pada rangkaian rotor dari motor induksi, transformasi yang sama dapat dilakukan. Bila ratio belitan efektif dari motor induksi adalah a_{eff} , maka bentuk transformasi dari tegangan rotor adalah :

$$E_2 = E_R' = a_{\text{eff}} E_{RO}$$

dan arus rotor menjadi :

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{\text{eff}}}$$

dan impedansi rotor menjadi :

$$Z_2 = a_{\text{eff}}^2 \left(\frac{R_R}{s} + j X_{RO} \right)$$

Bila didefinisikan menjadi :

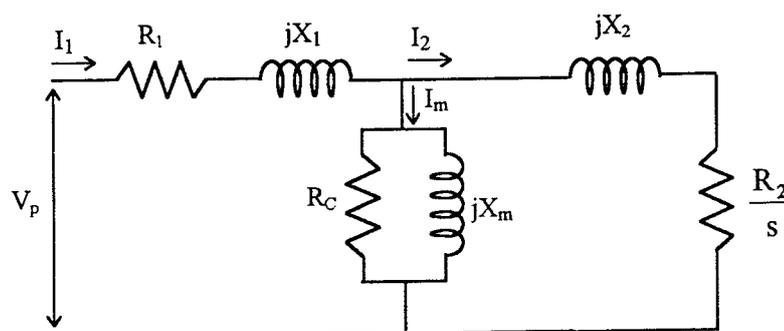
$$R_2 = a_{\text{eff}}^2 R_R$$

$$X_2 = a_{\text{eff}}^2 X_R$$

Dan rangkaian ekivalen terakhir dari motor induksi dapat dilihat pada gambar 2.8. Resistansi rotor dan reaktansi rotor dalam keadaan locked adalah sangat sulit atau tidak mungkin ditentukan secara langsung pada motor tipe rotor sangkar bajing, demikian pula untuk a_{eff} . Namun untuk harga R_2 dan X_2 masih bisa diukur secara langsung.

2.1.4. Daya dan kopel dalam motor induksi

Pada dasarnya motor induksi dapat dinyatakan sebagai trafo yang berputar. Dalam trafo, output merupakan tenaga listrik dari kumparan sekunder, sedangkan pada motor induksi sekundernya dihubungkan singkatkan sehingga tidak dihasilkan



Gambar 2.8⁸

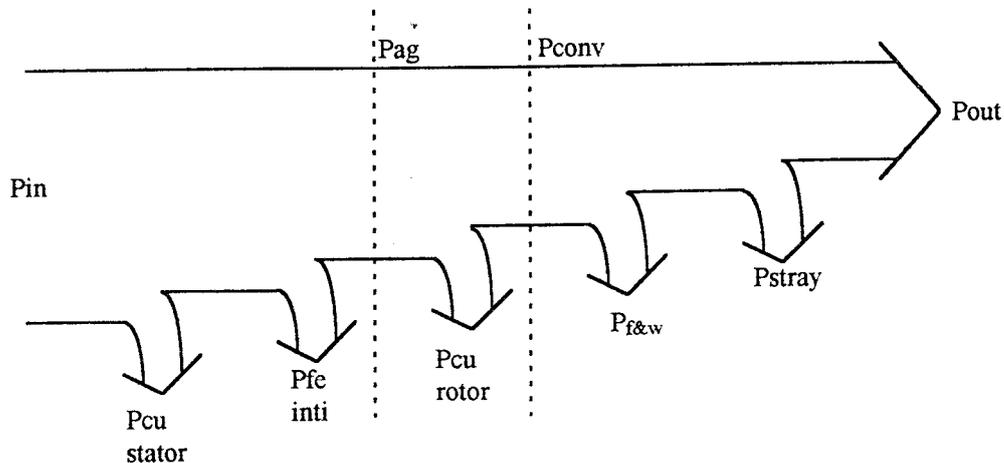
Rangkaian ekivalen perphasa dari motor induksi

tenaga listrik melainkan tenaga mekanis. Hubungan antara tenaga listrik input dan tenaga mekanis output dari motor induksi dapat dilihat dalam diagram aliran daya pada gambar 2.9.

Daya input pada motor induksi (P_{in}), merupakan daya listrik dengan tegangan dan arus tiga phasa. Kerugian pertama merupakan kerugian tembaga I^2R pada stator (P_{cu} stator). Kemudian rugi daya berupa histeresis dan arus eddy pada stator (P_{fe} inti). Daya yang tersisa diberikan kepada rotor melalui celah udara antara stator dan rotor. Daya ini disebut daya pada celah udara (P_{ag} = air gap power). Setelah daya diberikan pada rotor, sebagian akan hilang berupa kerugian

⁸ Ibid, hal. 495.

tembaga I^2R pada rotor dan sisanya diubah menjadi tenaga mekanis (P_{mec} = daya mekanis pada rotor). Setelah dikurangi dengan rugi gesekan dan rugi stray, akan dihasilkan daya output (P_{out}) dari motor.



Gambar 2.9⁹

Diagram aliran daya pada motor induksi

Arus input per fasa diperoleh motor induksi dari membagi tegangan input dengan impedansi.

$$I_1 = \frac{V_o}{Z_{eq}}$$

dimana :

$$Z_{eq} = R_1 + j X_1 + \frac{1}{G_c - j B_m + \frac{1}{R_2 + j X_2}}$$

Karena itu kerugian tembaga stator, rugi inti dan rugi tembaga rotor dapat dihitung. Kerugian tembaga pada stator diberikan oleh :

$$P_{cstator} = 3 I_1^2 R_1$$

⁹ Ibid, hal. 496.

Kerugian inti diberikan oleh :

$$P_{fe} = 3 E_1^2 G_c = \frac{3E_1^2}{R_c}$$

Sehingga daya pada celah udara diberikan oleh :

$$P_{ag} = P_{in} - P_{custator} - P_{fe}$$

Dalam rangkaian ekivalen terlihat bahwa elemen yang dapat menyerap daya dari celah udara adalah tahanan R_2/s . Jadi daya dalam celah udara diberikan oleh persamaan : $P_{ag} = 3 I_2^2 R_r$

Karena daya tidak berubah bila melalui trafo ideal, maka kerugian tembaga pada rotor dapat dinyatakan oleh :

$$P_{curotor} = 3 I_2^2 R_2$$

Setelah kerugian tembaga stator, kerugian inti dan kerugian rotor dikurangi, maka daya yang tersisa diubah dari daya elektris menjadi daya mekanis. Daya konversi yang juga disebut "developed mechanical power" diberikan oleh persamaan :

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{ag} - P_{curotor} \\ &= 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3 I_2^2 R_2 \\ &= 3 I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \end{aligned}$$

Dari persamaan terdahulu, maka kerugian tembaga rotor sama dengan daya pada celah udara dikalikan slip.

$$\begin{aligned} P_{curotor} &= s P_{ag} \\ P_{conv} &= P_{ag} - P_{curotor} = P_{ag} - s P_{ag} \\ &= (1-s) P_{ag} \end{aligned}$$

Akhirnya bila kerugian gesekan dan angin serta rugi stray, maka daya output adalah sebagai berikut :

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{fw}} - P_{\text{stray}}$$

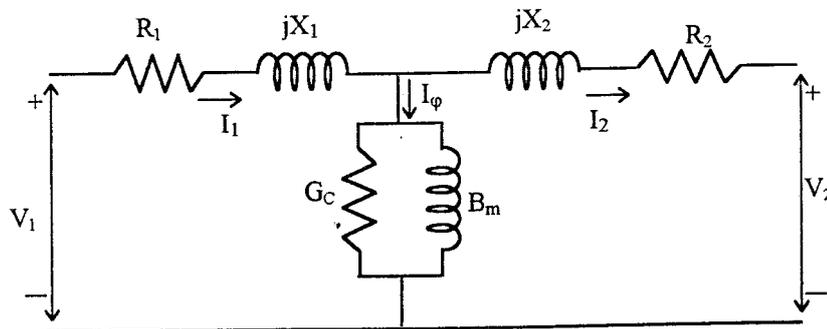
2.2. Transformator Daya

Transformator adalah suatu peralatan listrik statis yang dapat memindahkan daya listrik arus bolak-balik dari suatu rangkaian primer ke rangkaian yang lain (sekunder atau tersier) dengan tegangan dan arus yang berubah atau tetap, namun dengan frekwensi yang tetap. Proses pemindahan daya listrik ini melalui suatu gandengan magnet yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnet.

Ada dua metode analisis yang dapat digunakan dalam menganalisa sebuah transformator yaitu :

1. Teknik rangkaian pengganti berdasarkan pertimbangan fisis.
2. Pemecahan matematis yang berdasarkan teori klasik rangkaian terdangeng magnetis.

Dalam analisis transformator sebagai elemen rangkaian, ditentukan rangkaian ekuivalen seperti gambar 2.10 yang merupakan pengembangan dari rangkaian ekuivalen T dari transformator.

Gambar 2.10¹⁰

Rangkaian ekuivalen transformator

- Dimana :
- R_1 = tahanan efektif rangkaian primer
 - X_{L1} = reaktansi bocor primer
 - V_1 = tegangan primer
 - I_1 = arus primer
 - G_c = konduktansi dari tahanan non induktif
 - B_m = suseptansi suatu induktansi tanpa rugi
 - I_2' = komponen arus di dalam rangkaian primer yang melawan arus sekunder I_2 ($I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2$).
 - R_2' = tahanan efektif sekunder yang dirujuk pada sisi primer dengan mengalikan $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$.
 - X_{L2} = reaktansi bocor sekunder yang dirujuk di sisi primer.

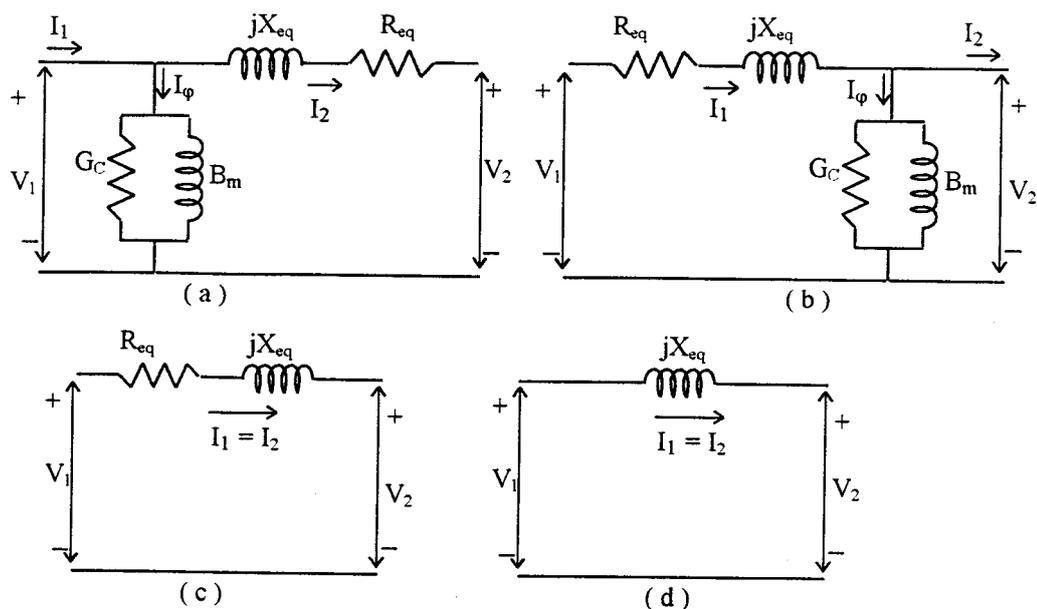
¹⁰ A.E.Fitzgerald, "Mesin-Mesin Listrik", Edisi keempat, Terjemahan Ir. Djoko Achyanto Msc.EE, Erlangga, Jakarta, hal 38.

2.2.1. Rangkaian ekivalen aproksimasi transformator daya

Rangkaian-rangkaian ekivalen aproksimasi yang biasa digunakan untuk analisa transformator daya berfrekwensi konstan dapat dilihat pada gambar 2.10. Semua besaran dalam rangkaian ini dirujuk ke sisi primer dan transformator ideal tidak diperlihatkan.

Perhitungan sering disederhanakan dengan memindahkan cabang paralel yang menyatakan arus eksitasi dari tegangan rangkaian T ke terminal primer atau sekunder, seperti dalam gambar 2.11a dan 2.11b. Ini adalah “cantilever circuit” (rangkaiannya penyangga). Cabang seri adalah gabungan tahanan dan reaktansi bocor yang dirujuk ke sisi yang sama. Impedansi ini disebut juga impedansi ekivalen dan komponennya adalah tahanan ekivalen R_{eq} dan reaktansi ekivalen X_{eq} seperti pada gambar 2.11a dan 2.11b. Sesatan (error) telah dimasukkan dengan mengabaikan penurunan tegangan dalam impedansi bocor primer dan sekunder yang ditimbulkan oleh arus peneralaan, tetapi sesatan ini tidak berarti pada kebanyakan persoalan yang menyangkut transformator sistem daya.

Penyederhanaan selanjutnya dihasilkan oleh pengabaian arus peneralaan keseluruhannya, seperti pada gambar 2.11c, dimana transformator dinyatakan sebagai impedansi seri ekivalen. Jika transformator itu besar (lebih dari beberapa kilovoltampere), tahanan ekivalen R_{eq} kecil dibandingkan reaktansi ekivalen X_{eq} dan sering dapat diabaikan, menghasilkan gambar 2.11d. Rangkaian pada gambar 2.11c dan 2.11d cukup akurat untuk kebanyakan persoalan sistem daya biasa.

Gambar 2.11¹¹

Rangkaian ekuivalen aproksimasi transformator daya

2.2.2. Rugi tembaga

Pada umumnya kumparan transformator terbuat dari tembaga yang mempunyai tahanan jenis, sehingga pada kumparan primer terdapat tahanan sebesar R_1 ohm, dan pada kumparan sekunder terdapat tahanan sebesar R_2 ohm.

Dengan adanya arus yang mengalir pada kumparan primer maupun sekunder, maka pada kumparan akan timbul kerugian daya yang disebabkan oleh tahanan jenis pada kedua kumparan tersebut yang kemudian disebut dengan rugi tembaga. Dalam bentuk matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P_{cu} = I_n^2 R_{2eq}$$

dimana : P_{cu} = rugi tembaga transformator (Watt),

I_n = arus yang mengalir pada kumparan sekunder (ampere),

¹¹ Ibid, hal. 41.

R_{2eq} = tahanan kumparan dilihat dari sisi sekunder (ohm).

Dari persamaan diatas terlihat bahwa rugi tembaga tergantung pada arus yang mengalir pada kumparan sekunder atau arus beban. Rugi tembaga pada transformator akan berubah sebanding dengan kuadrat perubahan arus beban.

2.2.3. Rugi inti (rugi besi)

Rugi inti atau rugi besi terjadi pada bahan inti yang terbuat dari bahan ferromagnetik yang pada prinsipnya disebabkan oleh :

a. Fenomena histeresis

Adanya fenomena histeresis pada bahan ferromagnetik inti yaitu kecenderungan untuk mempertahankan sifat kemagnetan bahan ferromagnetik terhadap perubahan medan magnet luar. Besarnya rugi histeresis pada inti besi transformator adalah :

$$P_h = K_h f B_{max}^v$$

Jika diketahui : $E = - 4,44 f N A B_{max}$

$$v = 1,6$$

maka :
$$B_{max} = \frac{E}{4,44 f N A}$$

$$P_h = K_h E^{1,6} f^{0,6}$$

dimana : P_h = rugi histeresis (Watt),

E = tegangan induksi (Volt),

f = frekwensi (Hz).

b. Arus pusar

Arus pusar ini timbul karena adanya perubahan medan magnet yang mempunyai komponen tegak lurus terhadap penampang melintang inti. Sedangkan perubahan medan magnet tersebut terjadi karena mengalirnya arus bolak-balik pada kumparan transformator. Besarnya rugi arus pusar adalah :

$$P_e = K_e f^2 B_{\max}$$

dimana : P_e = rugi arus pusar (Watt),

f = frekwensi (Hz),

B_{\max} = kerapatan fluks maksimum (wb/m²),

$$K_e = \frac{n^2 r^2 v}{6 \rho}$$

r = tebal satu lapisan inti,

v = volume inti,

ρ = tahanan jenis inti.

Bila diketahui : $E = 4,44 f N \phi_{\max}$

$$B = \frac{\phi_{\max}}{A}$$

$$B = \frac{E}{4,44 f N A}$$

maka substitusi persamaan diatas menghasilkan :

$$P_e = K_e f^2 \left(\frac{E}{4,44 f N A} \right)^2$$

$$P_e = K_e E^2$$

dimana : P_e = rugi arus pusar (Watt),

E = tegangan induksi (Volt).

Jadi besarnya rugi besi secara keseluruhan adalah :

$$P_b = P_e + P_h$$

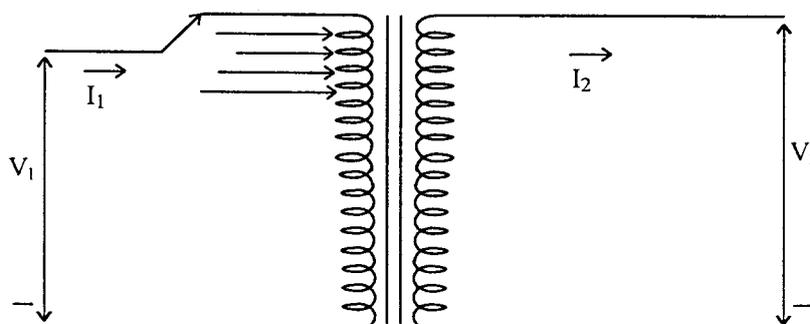
$$P_b = K_e E^2 + K_h E^{1.6} f^{0.6}$$

2.2.4. Hubungan transformator

Hubungan transformator yang banyak dipakai pada transformator tiga fasa terdiri dari hubungan bintang (Y), hubungan delta (Δ), dan hubungan zig-zag (Z).

2.2.5. “On Load Tap Changer Transformer”

Untuk mempertahankan agar tegangan pada sisi sekunder sebuah trafo tetap konstan, dapat digunakan trafo pengubah penyadap berbeban (“on load tap changer”). Transformator tersebut memiliki tap-tap (penyadap), umumnya pada sisi primer, yang dapat naik turun menyesuaikan dengan fluktuasi tegangan dalam range tertentu pada transformator tersebut untuk menjaga agar tegangan pada sisi sekunder tetap, walaupun dalam keadaan berbeban.



Gambar 2.12

Rangkaian transformator “on load tap changer”

Bab III

FAKTOR-FAKTOR KUALITAS ENERGI LISTRIK

Sistem tenaga listrik di Indonesia menggunakan sistem 3 phase yang seimbang, yang artinya bahwa tegangan 3 phase yang dihasilkan oleh suatu generator dalam keadaan seimbang, baik besar tegangannya maupun frekuensi yang dihasilkannya dan gelombang tegangan dan arusnya berbentuk sinusoidal. Oleh karena itu pembebanan pada sistem seperti ini juga harus direncanakan dalam keadaan seimbang.

Penyedia jasa kelistrikan sudah dirancang untuk membangkitkan energi listrik yang andal. Namun, tidak selamanya mereka dapat membangkitkan energi listrik dengan kualitas yang diperlukan bagi pengoperasian peralatan yang sensitif. Pengoperasian yang normal dari peralatan-peralatan listrik akan menghasilkan gangguan dan masalah yang tidak diharapkan dalam sistem tenaga. Sehingga, konsumen akan menerima energi listrik yang telah cacat.

Adapun kualitas tenaga listrik ditentukan oleh faktor-faktor di bawah ini :

1. Neutral dan grounding,
2. Pemadaman,
3. Sag, surge dan transient tegangan,
4. Variasi frekwensi, RFI, dan ESD,
5. Faktor daya,
6. Turun naiknya tegangan,

7. Distorsi harmonik,
8. Ketidakseimbangan tegangan.

3.1. Masalah Netral dan Grounding

Banyak masalah dalam kualitas energi listrik yang disebabkan oleh kesalahan pada netral dan grounding. Penyebab masalah ini diantaranya adalah :

- a) Tidak mengikuti standar-standar pemasangan listrik yang ada.
- b) Sambungan kabel ground/netral yang tidak sempurna.
- c) Adanya kemungkinan sambungan yang kendur atau lepas, baik oleh efek termal maupun karena karat.

Akibat yang timbul dari kesalahan sistem netral dan grounding bermacam-macam, yang pada dasarnya dapat mengancam keselamatan jiwa ataupun merusak peralatan. Salahnya pemasangan sistem grounding dan netral dapat menyebabkan :

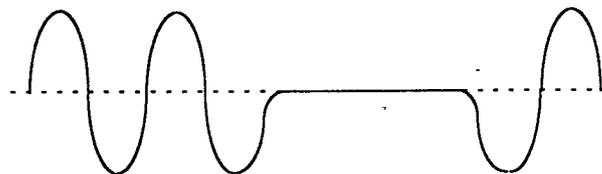
- a) benda kerja menjadi bertegangan,
- b) kemungkinan fatal terhadap jiwa manusia apabila terjadi hubung singkat pada salah satu peralatan,
- c) masuknya noise ke dalam sistem yang berakibat rusaknya peralatan atau terganggunya aliran data yang dapat menyebabkan kesalahan di terminal ataupun di printer.

3.2. Masalah Pemadaman

Masalah pemadaman membawa dampak yang berbeda-beda terhadap jenis beban listrik yang berbeda. Bagi beberapa peralatan listrik pemadaman tidak membawa akibat yang berpengaruh namun pada peralatan yang lainnya, khususnya peralatan modern sekarang ini, pemadaman listrik dalam orde waktu puluhan milidetik dapat merusak perangkat keras maupun perangkat lunaknya.

Pemadaman bisa disebabkan oleh :

- a) petir,
- b) adanya peralatan yang rusak (hubung singkat) sehingga sekering panel utama putus,
- c) adanya pembatasan daya dari PLN,
- d) beban lebih pada gardu sehingga seluruh distribusinya padam.



Gambar 3.1¹²

Bentuk gelombang outage (pemadaman)

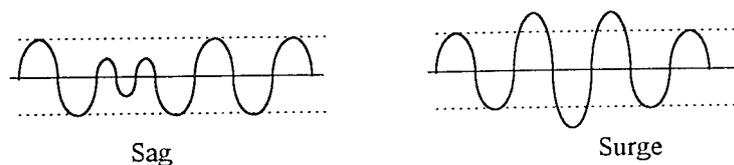
3.3. Masalah Sag, Surge, Noise, dan Tegangan Transien

Masalah sag dan surge berkaitan dengan naik-turunnya tegangan yang terjadi hanya dalam beberapa cycle (100 milidetik) akan tetapi tetap merupakan

¹² Leslie Lamarre, "Tacling Power Quality Issue on Both Sides of the meter", EPRI Journal, July/Augustt 1991, hal. 17

ancaman yang serius apabila terjadi diluar daerah aman. Sebab bisa mengakibatkan kerusakan baik terhadap perangkat keras maupun perangkat lunaknya.

Sag (tegangan turun) biasaya terjadi apabila ada beban peralatan listrik yang sangat besar dihidupkan. Akan tetapi juga bisa terjadi apabila ada petir yang dihubung singkatkan lewat arrester. Surge (tegangan naik) biasanya terjadi apabila ada beban peralatan listrik yang besar dimatikan.



Gambar 3.2¹³

Bentuk gelombang sag dan surge

Tegangan transien merupakan masalah kualitas energi listrik yang telah lama ada. Beban-beban listrik sekarang, yang kebanyakan merupakan peralatan yang berdasarkan pada mikroprosesor, lebih sensitif dan tidak tahan terhadap tegangan transien.

Penyebab tegangan transien cukup bervariasi, akan tetapi kebanyakan timbul dari dua bagian besar yaitu :

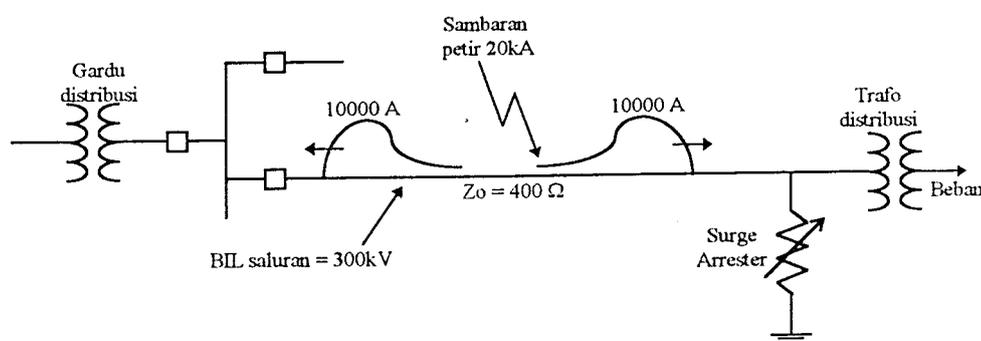
- a) Petir, yang masuk melalui jalur netral karena biasanya tegangan transien yang masuk melalui jalur phasa pada saat terjadi petir langsung dihubung-singkatkan ke ground melalui "lightning arrester" dan mempengaruhi jalur netral yang dibumikan.

¹³ Ibid, hal. 17

- b) Adanya beban atau peralatan-peralatan yang dihidup-matikan baik secara otomatis maupun disengaja ataupun sekering yang putus (fault clearing).

Terhadap peralatan elektronis, tegangan transien dapat menyebabkan :

- kesalahan data pada media penyimpan,
- kesalahan pada proses pengolahan data,
- kerusakan perangkat keras,
- kesalahan pada terminal maupun printer.



Gambar 3.3¹⁴

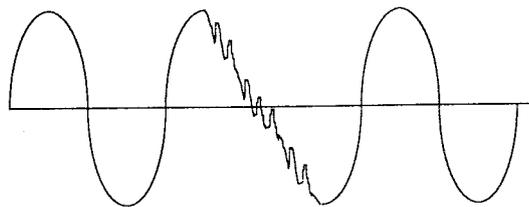
Tegangan transien akibat sambaran petir

Masalah noise sering menimbulkan akibat yang serius terhadap sistem komputerisasi. Noise berupa seperti tegangan transien berenergi rendah yang terjadi dalam waktu yang sangat singkat yaitu dibawah 1 milidetik.

Penyebab dari timbulnya noise juga bermacam-macam seperti :

¹⁴ "Power Quality - Two Perspective", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 5, no. 3, July 1990, hal. 1505

- a) adanya tetangga (terutama di daerah industri) yang memakai mesin las,
- b) switching peralatan-peralatan listrik,
- c) switching pada kapasitor,
- d) adanya sambungan listrik yang kurang baik,
- e) adanya pengendali kecepatan motor,
- f) switching power supply.



Gambar 3.4¹⁵

Efek dari switching kapasitor

3.4. Masalah Variasi Frekuensi, RFI, dan ESD

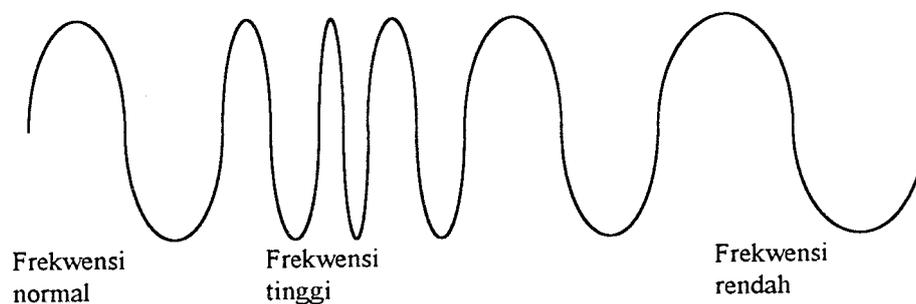
Masalah frekwensi yang berubah-ubah juga merupakan gangguan yang dapat merusak suatu peralatan listrik tertentu bila toleransi terhadap frekwensi dari peralatan tersebut dilewati. Seperti halnya komputer dimana toleransi perubahan frekwensi antara 48,5 HZ sampai dengan 51,5 Hz. Diluar daerah frekwensi ini dapat menimbulkan kerusakan pada data, bahkan untuk beberapa peralatan bisa mengakibatkan kerusakan pada perangkat keras.

Dengan semakin banyaknya peralatan elektronik, maka semakin banyak pula kemungkinan pencemaran lingkungan oleh adanya frekwensi radio (Radio

¹⁵ Ibid, hal 1505

Frequency Interference) yang ditimbulkan oleh peralatan tersebut dan beberapa peralatan komunikasi sekarang ini. Pencemaran frekwensi ini bisa mengganggu sistem komunikasi tersebut yang pada akhirnya mengganggu kerja sistem.

Pada tempat-tempat tertentu, bukan tidak mungkin timbul gangguan karena adanya transmisi radio yang masuk ke dalam sistem tenaga listrik karena tidak adanya perlindungan terhadap RFI ini, maupun kemungkinan panjang kabel tertentu yang dapat bersifat sebagai antena.



Gambar 3.5¹⁶

Bentuk gelombang jika terjadi masalah pada frekwensi

Di Indonesia masalah ESD (Electro Static Discharge) tidak terlalu nyata mengganggu, karena kelembaban relatifnya rata-rata tinggi, akan tetapi bagaimanapun juga masalah ini harus diwaspadai. Pada beberapa bahan tertentu dan kondisi kelembaban tertentu, pergerakannya/gesekannya dapat menimbulkan tegangan statis sampai ribuan volt. Meskipun jarang terjadi di Indonesia karena kelembaban relatif rata-rata tinggi (diatas 65%), bukan tidak mungkin adanya beberapa kondisi ruangan yang kelembaban relatifnya 40%.

¹⁶ Rama Royani, "PowerQuality", Seminar Power Quality 1991, hal. 3

3.5. Faktor Daya

Sebagian besar penggunaan peralatan memerlukan dua komponen arus. Arus total diperinci dalam komponen aktif dan reaktif, sehingga didapat analisa dan pengertian yang lebih sederhana.

1. Arus yang menghasilkan daya kerja, biasanya dalam bentuk panas, cahaya atau daya mekanis. Daya aktif diukur dalam unit Watt.
2. Arus magnetisasi, dibutuhkan untuk menghasilkan fluks yang diperlukan dalam operasi peralatan elektromagnetis. Tanpa arus magnetisasi energi tidak dapat mengalir lewat inti trafo atau menembus celah udara dalam suatu motor induksi. Daya reaktif diukur dalam unit var.

Penjumlahan secara vektoris dari arus aktif dan arus reaktif menghasilkan arus total, yang dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$I_t = \sqrt{(\text{arus aktif})^2 + (\text{arus reaktif})^2}$$

Pada suatu tegangan V; daya aktif, daya reaktif dan daya nyata adalah sebanding dengan arus, dimana hubungannya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{Daya nyata (VA)} = \sqrt{(\text{daya aktif})^2 + (\text{daya reaktif})^2}$$

Persamaan di atas didasarkan pada frekwensi dasar dengan mengasumsikan harmonik sama dengan nol.

Terdapat sedikitnya dua definisi yang umum untuk faktor daya. Definisi pertama menyatakan faktor daya sebagai cos dari sudut perbedaan fasa dimana

arus mendahului atau tertinggal dari tegangan. Faktor daya juga didefinisikan sebagai ratio antara daya aktif dan daya nyata. Faktor daya bervariasi antara 0 s/d 1, tapi biasanya diberikan dalam persen.

Faktor daya mungkin leading atau lagging, tergantung pada arah aliran dari daya aktif dan reaktif. Jika keduanya arahnya sama maka faktor daya pada titik referensi tersebut adalah lagging. Dan jika arahnya berlawanan, faktor daya adalah leading. Kapasitor dan motor sinkron dengan over eksitasi adalah sumber daya reaktif sehingga faktor dayanya selalu leading.

Motor induksi mempunyai faktor daya lagging, sebab membutuhkan baik daya aktif maupun reaktif (Arahnya sama-sama menuju ke motor). Sebuah motor sinkron dengan penguatan lebih memberikan daya reaktif pada sistem, sedangkan daya aktif mengalir ke motor (arah daya aktif berlawanan dengan daya reaktif), sehingga faktor dayanya leading.

Pada umumnya beban listrik dari suatu sistem tenaga listrik di industri mempunyai faktor kerja lagging. Sehingga beban tersebut membutuhkan daya reaktif sangat besar dan mengakibatkan faktor daya semakin kecil. Dimana faktor daya yang kecil akan menimbulkan berbagai kerugian baik di pihak pembangkit maupun di pihak konsumen. Kerugian di pihak pembangkit antara lain :

- Menurunnya efisiensi peralatan, seperti transformator daya dan saluran penghantar. Dalam hal ini untuk daya aktif yang sama, menurunnya faktor daya akan menambah besar arus yang melalui peralatan tersebut, sehingga rugi-rugi daya akan bertambah besar. Dengan demikian efisiensi peralatan akan turun.

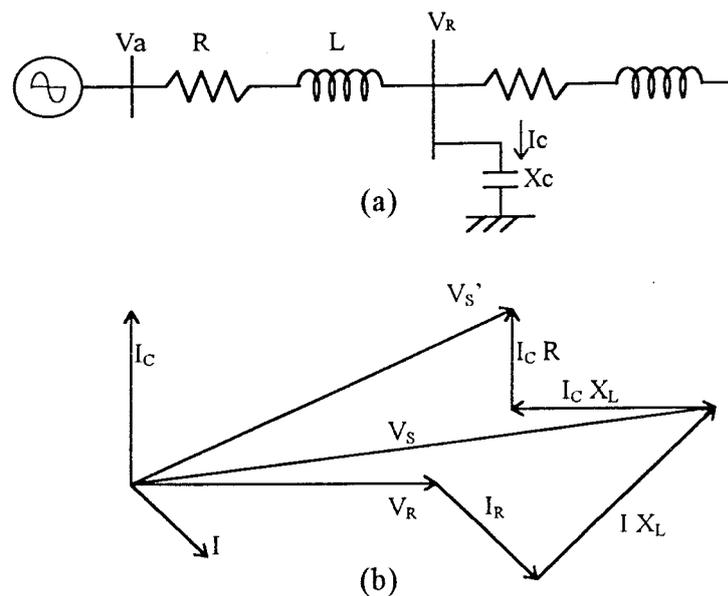
☑ Menurunnya kapasitas penyaluran daya dari penghantar. Umumnya kapasitas penyaluran daya dari suatu penghantar ditentukan oleh besarnya arus yang mengalir melalui penghantar tersebut. Bila faktor daya turun untuk suatu daya aktif yang sama, maka arus yang mengalir pada penghantar menjadi lebih besar, sedangkan kapasitas penyaluran tetap. Sehingga dari kondisi ini untuk arus yang sama, menurunnya faktor daya dapat menurunkan kapasitas penyaluran daya dari suatu penghantar.

Sedangkan kerugian di pihak beban antara lain :

- ☑ Perbedaan tegangan listrik pada kondisi beban ringan dan beban penuh relatif besar, berarti pengaturan tegangan menjadi buruk.
- ☑ Instalasi listrik dengan pembatasan arus tertentu, untuk melayani daya aktif tertentu (kW) akan memerlukan kapasitas yang lebih besar.

Untuk menekan kerugian diatas, pada dasarnya adalah dengan cara mengurangi arus yang mengalir pada jaringan tanpa mengurangi jumlah beban. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara mengkompensasikan daya reaktif yang mengalir pada jaringan sistem tenaga listrik. Salah satu cara mengkompensasi daya reaktif adalah dengan menambahkan kapasitor shunt yang berfungsi sebagai sumber daya reaktif yang dipasang pada bus-bus beban maupun di sepanjang jaringan tenaga listrik.

Yang dimaksud dengan kompensasi daya reaktif dengan kapasitor shunt adalah dengan memasang sumber daya reaktif (kapasitor shunt) secara paralel dengan jaringan tenaga listrik. Kapasitor shunt yang dipasangkan paralel dapat menurunkan tegangan jatuh pada sistem tenaga listrik. Hal ini disebabkan adanya arus kapasitif yang mengalir pada kapasitor tersebut.



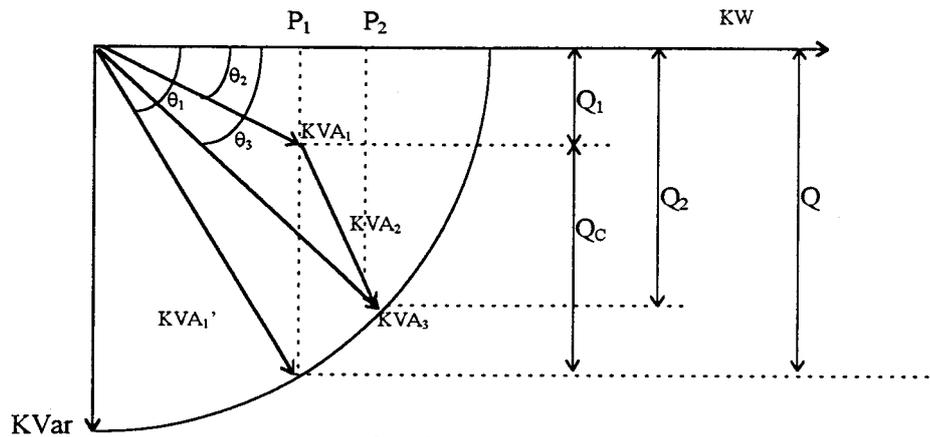
Gambar 3.6.

(a) Pemasangan kapasitor shunt pada jaringan tenaga listrik

(b) Diagram vektor tegangan dan arus

Dengan berkurangnya komponen arus reaktif yang mengalir pada sistem, maka arus total akan mengecil, tegangan jatuh akan berkurang dan daya reaktif yang mengalir di sistem tenaga listrik tersebut juga akan berkurang.

Kompensasi daya reaktif pada sistem dengan menggunakan kapasitor shunt secara umum dapat dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 3.7.

**Pengaruh kompensasi daya reaktif terhadap
kemampuan penyaluran daya**

Dimana :

- θ_1 = beda sudut fasa arus - tegangan sebelum kompensasi
- θ_2 = beda sudut fasa arus - tegangan sesudah kompensasi
- θ_3 = beda sudut fasa arus - tegangan sesudah penambahan KVA pada faktor daya semula

KVA_1 = KVA setelah kompensasi

KVA_2 = KVA tambahan dengan faktor daya semula, yang dapat ditambahkan setelah kompensasi

KVA_3 = KVA yang diterapkan sesudah kompensasi dan penambahan daya

KVA_1' = KVA sebelum kompensasi

P_1 = KW yang diserap sistem sebelum kompensasi

P_2 = KW yang diserap sistem sesudah kompensasi

Q = KVar pada sistem sebelum kompensasi

Q_c = KVar yang berasal dari kapasitor shunt

Q_1 = KVar sesudah kompensasi

Q_2 = KVar sesudah penambahan KVA

Dengan penambahan daya reaktif dari kapasitor shunt, maka daya reaktif yang mengalir pada jaringan diperkecil. Pengurangan daya reaktif ini akan menyebabkan KVA yang disalurkan oleh sumber tenaga menjadi lebih kecil. Dengan demikian dapat ditambahkan sejumlah KVA dengan kondisi faktor kerja yang sama dengan faktor kerja awal (KVA_2), apabila diinginkan. Sehingga KVA yang baru (KVA_3) sama dengan KVA sebelum kompensasi (KVA_1). Jadi dengan kompensasi, penyaluran daya dapat diperbesar.

3.6. Turun Naiknya Tegangan

Turunnya tegangan sering terjadi pada sistem tenaga listrik yang kapasitasnya terbatas sehingga pada jam-jam tertentu saat semua beban listrik bekerja tegangannya akan rendah, sedangkan pada jam-jam tertentu dimana beban listriknya berkurang maka tegangan akan kembali normal bahkan bisa menjadi terlampau tinggi.

Sama halnya seperti sag dan surge, tinggi rendahnya tegangan yang berada diluar daerah aman (batas-batas toleransi peralatan) juga akan mengganggu bahkan dapat menyebabkan kerusakan baik pada perangkat kerasnya maupun pada perangkat lunaknya.

Penyebabnya dari drop tegangan yaitu adanya arus yang mengalir melalui impedansi. Persamaan pendekatan berikut menunjukkan pentingnya pengurangan komponen daya reaktif dalam usaha untuk mengurangi drop tegangan.

$$\Delta V \cong R I \cos \phi \pm X I \sin \phi$$

dimana ΔV adalah perubahan tegangan, yang mana bisa berupa drop tegangan atau kenaikan tegangan.

ΔV , R , X dan I nilai-nilainya bisa dinyatakan sebagai berikut : ΔV dalam volt, R dan X dalam ohm dan I dalam ampere atau dinyatakan dalam besaran per-unit. ϕ adalah sudut pf. Tanda plus digunakan jika pf-nya lagging dan tanda minus jika pf-nya leading. ΔV bernilai positif (drop tegangan) untuk circuit yang memiliki pf lagging dan bernilai negatif (kenaikan tegangan) untuk jenis industri yang memiliki pf leading. Hal ini dapat ditulis sebagai berikut :

$$\Delta V \cong (R \times \text{arus aktif}) \pm (X \times \text{arus reaktif})$$

Bentuk yang paling berguna adalah :

$$\Delta V \cong I (R \cos \phi \pm X \sin \phi)$$

dimana $R \cos \phi$ menunjukkan kontribusi dari daya aktif terhadap drop tegangan per ampere dari total arus, dan $X \sin \phi$ menunjukkan kontribusi daya reaktif terhadap drop tegangan. Pada keadaan-keadaan tertentu $X \sin \phi$ mencapai beberapa kali lebih besar dari $R \cos \phi$, katakanlah 5 - 10 kali lebih besar. Dengan demikian, besar aliran daya reaktif menghasilkan drop tegangan yang besarnya adalah beberapa kali lebih dari yang dihasilkan oleh aliran daya nyata. Dari persamaan di atas terlihat jelas pengaruh faktor daya terhadap drop tegangan yang terjadi.

Karena perbaikan pf secara langsung mengurangi aliran daya reaktif sehingga merupakan cara paling efektif untuk mengurangi drop tegangan.

Jika terjadi masalah tegangan berlebihan, maka dianjurkan untuk mengubah tap dari transformator. Regulasi tegangan pada suatu sistem dari keadaan tanpa beban hingga ke beban penuh kenyataannya tidak dipengaruhi oleh jumlah kapasitor; kecuali jika kapasitor tersebut diswitch (on atau off). Namun penambahan kapasitor dapat menaikkan level tegangan. Kenaikan tegangan akibat kapasitor pada kebanyakan industri dengan sistem distribusi daya yang modern dan transformasi tunggal jarang mencapai lebih dari beberapa persen.

3.6.1. Pengaruh turun naiknya tegangan pada transformator

3.6.1.1. Rugi tembaga

3.6.1.1.1. "Off Load Tap Changer Transformer"

Secara umum besar dari rugi tembaga dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_{cu} = I_2^2 R_{2eq}$$

Sehingga untuk suatu kVA yang konstan besar arus adalah sebagai berikut :

$$I_2 = \frac{kVA}{\sqrt{3} V_2}$$

Dimana : kVA = Kapasitas trafo 3 phasa

V2 = tegangan phasa-phasa sisi sekunder

Untuk suatu beban dengan model impedansi yang konstan, maka jika terjadi penurunan tegangan akan terjadi pula penurunan arus. Sehingga rugi tembaga transformator tanpa pengubah penyadap berbeban menjadi turun seiring dengan penurunan arus pada belitannya.

Dan jika tegangan berubah dari tegangan nominal V_1 menjadi V_1^* , maka :

$$I_2^* = \frac{V_2}{Z_L} = \frac{a V_1^*}{Z_L}$$

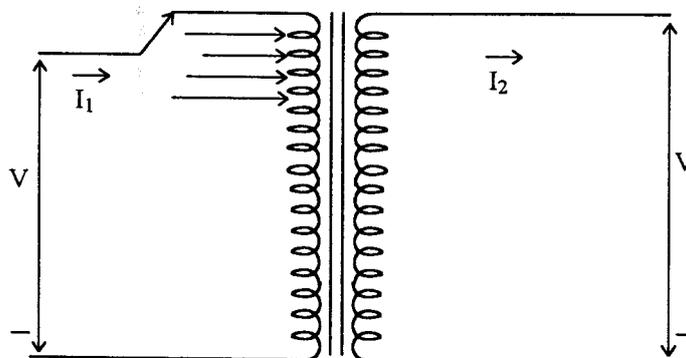
dimana : a = ratio transformator

Sehingga perubahan besarnya rugi tembaga diperoleh sebagai berikut :

$$\Delta P_{cu} = (I_2^*)^2 R_{2eq} - (I_2)^2 R_{2eq}$$

3.6.1.1.2. "On Load Tap Changer Transformer"

Pada transformator jenis "on load tap changer", tegangan pada salah satu sisi (umumnya sisi sekunder) dijaga tetap, dengan cara mengubah kedudukan penyadap (tap) pada belitan sisi lainnya (sisi primer) transformator tersebut.



Gambar 3.8.

Rangkaian transformator "on load tap changer"

Jika terjadi penurunan tegangan pada sisi primer, maka penyadap akan turun untuk menjaga agar tegangan pada sisi sekunder tetap. Sehingga jumlah belitan primer turun, yang berarti impedansi belitan primer turun. Dan rugi tembaga yang terjadi ialah : $P_{cu} = 3 I_1^2 R_1$

3.6.1.2. Rugi inti besi

Perbandingan antara rugi histerisis dan rugi Eddy Current terhadap rugi besi total tergantung dari bahan inti dan diberikan pada tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1¹⁷

Perbandingan rugi histerisis dan eddy current

	$\frac{P_h}{P_{tot}}$	$\frac{P_e}{P_{tot}}$
Oriented steel	0,5	0,5
Non-oriented steel	0,7	0,3

dimana : $\frac{P_h}{P_{tot}}$ = Perbandingan rugi histerisis terhadap rugi besi total.

$\frac{P_e}{P_{tot}}$ = Perbandingan rugi arus Eddy terhadap rugi besi total.

Rugi-rugi histerisis dapat dinyatakan dengan :

$$P_h = k_h f B_{max}^v$$

Jika diketahui : $E = -4,44 f N B_{max} A$

$$v = 1,6$$

¹⁷ SPLN 8A: 1978, Lampiran Surat Keputusan Direksi PLN No. 033/DIR/78, 14 Agustus 1978, hal. 10

$$\text{maka : } B_{\max} = \frac{E}{4,44 f N A}$$

$$P_h = k_h E^{1,6} f^{-0,6}$$

Pada saat $E = E_{\text{nom}}$ maka didapat P_{hnom} . Pada saat $E = E^*$, maka perubahan rugi histerisis diperoleh sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \Delta P_h &= \frac{P_{\text{hnom}}}{E_{\text{nom}}^{1,6}} (E^*)^{1,6} - P_{\text{hnom}} \\ &= P_{\text{hnom}} \left\{ \left(\frac{E^*}{E_{\text{nom}}} \right)^{1,6} - 1 \right\} \end{aligned}$$

Secara umum rugi arus Eddy dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$P_e = k_e f^2 B_{\max}^2$$

Jika diketahui : $E = 4,44 f N B_{\max} A$

$$\text{maka, } B_{\max} = \frac{E}{4,44 f N A}$$

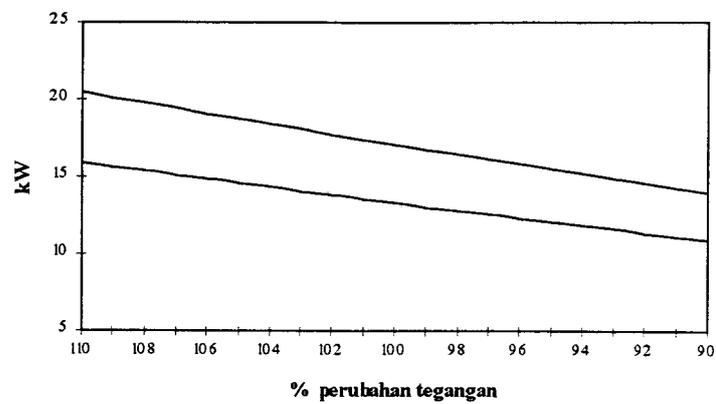
$$P_e = k_e E^2$$

Pada saat E_{nom} maka terdapat rugi P_{enom} . Pada saat $E = E^*$, maka perubahan rugi arus pusar diperoleh sebagai berikut :

$$\Delta P_e = P_{\text{enom}} \left\{ \left(\frac{E^*}{E_{\text{nom}}} \right)^2 - 1 \right\}$$

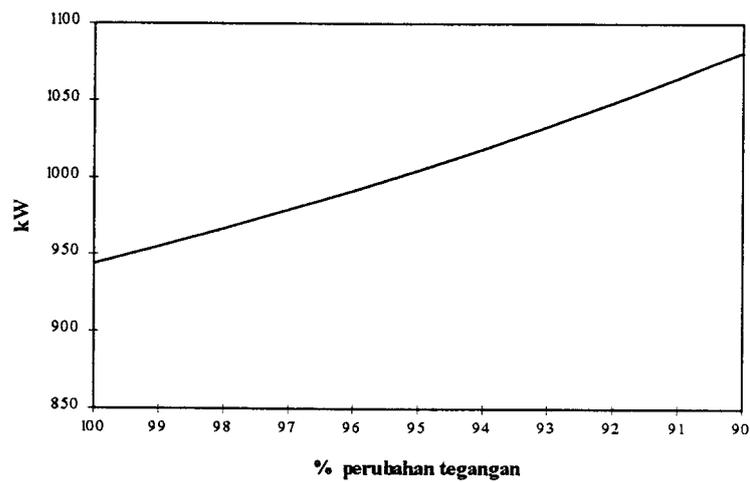
Total perubahan rugi-rugi daya adalah sebagai berikut :

$$\Delta P_t = \Delta P_{cu} + \Delta P_h + \Delta P_e$$



Gambar 3.8

Peningkatan rugi-rugi daya akibat turun naiknya tegangan pada transformator 10 MVA, 20kV/6,3kV



Gambar 3.9.

Peningkatan rugi daya karena penurunan tegangan pada Main Transformer 150 kV

3.6.2. Rugi daya pada konduktor

Pada suatu beban kVA tertentu maka dapat dilakukan perhitungan pengaruh turunnya tegangan terhadap rugi-rugi pada saluran.

Untuk perubahan tegangan phasa-phaasa pada salah satu sisi saluran dari tegangan nominal V menjadi V^* , untuk beban di sisi saluran yang lain berupa model impedansi beban tetap, maka terjadi perubahan arus sebesar :

$$I^* = \frac{V^*}{Z_L}$$

Dimana Z_L = impedansi beban .

Dan perubahan besarnya rugi tembaga diperoleh sebagai berikut :

$$\Delta P_{cu} = (I^*)^2 R - I^2 R$$

Dimana R = resistansi saluran.

Persamaan di atas dapat dinyatakan dalam V^* dan V dimana $V^* = kV$, yaitu :

$$\begin{aligned} \Delta P_{cu} &= (I^{*2} - I^2) R \\ &= \left[\left(\frac{kVA}{\sqrt{3} V^*} \right)^2 - \left(\frac{kVA}{\sqrt{3} V} \right)^2 \right] R \\ &= \left(\frac{kVA}{\sqrt{3} V} \right)^2 R \left(\frac{1}{k} - 1 \right) \\ &= P_{cunom} \left(\frac{1}{k} - 1 \right) \end{aligned}$$

3.6.3. Rugi daya pada Motor induksi

Pada pengoperasian motor induksi 3 fasa pada keadaan normal, terdapat kerugian yang meliputi rugi tembaga pada stator, rugi inti besi, rugi tembaga rotor, rugi gesekan dan angin, serta rugi stray.

Besar dari torsi induksi dinyatakan dalam persamaan :

$$t_{\text{ind}} = \frac{3}{\omega_s} E_t^2 \frac{r_2'/s}{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_{2s})^2}$$

Bila terjadi perubahan tegangan menjadi E^* , maka akan terjadi perubahan pula pada slip menjadi s^* dan perubahan pada arus menjadi I^* .

Daya output motor (P_{out}) akibat perubahan tegangan menjadi :

$$P_{\text{ag}} = 3 I_1^{*2} R_f$$

$$P_{\text{conv}^*} = P_{\text{ag}} (1-s^*)$$

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}^*} - (P_{\text{gesek}} + P_{\text{stray}})$$

dimana : I_1 = arus stator

R_f = resistansi ekivalen dari rangkaian rotor dan medan

P_{ag} = daya yang diinduksikan ke celah udara

P_{conv} = daya mekanis pada rotor

P_{out} = daya keluaran pada rotor

Bila terjadi perubahan tegangan, maka akan diikuti pula dengan perubahan arus pada rotor. Dimana perubahan kerugian-kerugiannya adalah :

$$\Delta P_{\text{curotor}} = (s^*P_{ag*}) - sP_{ag}$$

$$\Delta P_{\text{custator}} = 3 (I_1^*{}^2 - I_1^2) R_1$$

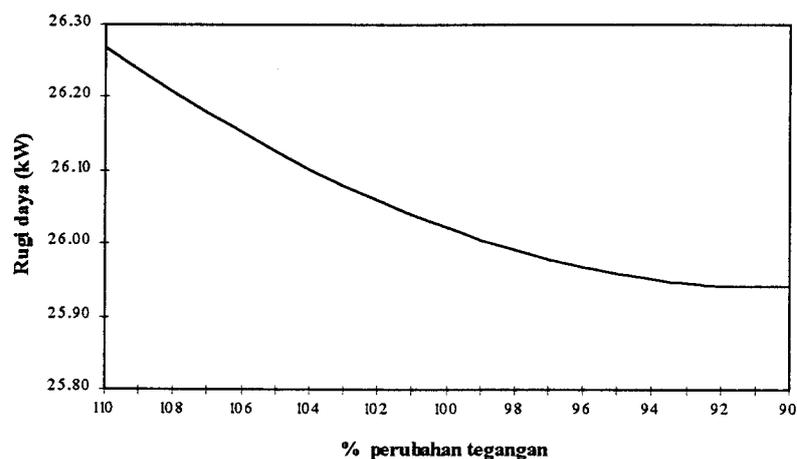
$$\Delta P_{fe} = \frac{3}{R_c} (E_1^*{}^2 - E_1^2)$$

$$\Delta P_{\text{tot}} = \Delta P_{\text{curotor}} + \Delta P_{\text{custator}} + \Delta P_{fe}$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{\text{curotor}} + P_{\text{custator}} + P_{fe} + W_{\text{loss}}$$

$$P^*_{in} = P^*_{out} + P^*_{\text{curotor}} + P^*_{\text{custator}} + P^*_{fe} + W_{\text{Loss}}$$

$$\Delta \text{Eff} = \left(\frac{P_{out}^*}{P_{in}^*} \right) \times 100\% - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\%$$



Gambar 3.10

Penurunan rugi daya akibat turun naiknya tegangan
pada motor induksi 1072 kW

3.7. Distorsi Harmonik

Harmonik dapat terjadi karena komponen tak linier pada sistem jaringan tenaga listrik antara lain adalah tanur busur listrik, kompensator statis untuk pengaturan daya reaktif serta peralatan elektronik seperti konverter DC dan pengaturan kecepatan motor (variable speed drive). Komponen-komponen tersebut arus tak sinusoidal yang mengandung komponen-komponen harmonik. Distorsi yang disebabkan oleh komponen jaringan seperti transformator dan mesin-mesin listrik pada umumnya sangat rendah dan dapat diabaikan. Sedangkan beban-beban tak linier seperti konverter arus searah dan tanur busur, biasanya menimbulkan distorsi yang cukup berarti pada jaringan.

Secara garis besar pengaruh harmonik terhadap sistem tergantung dari sumber harmonik, letak sumber harmonik dan karakteristik jaringan. Dalam upaya memperoleh efisiensi dalam pengoperasian sistem dan pemanfaatan tenaga listrik pengaruh harmonik perlu diperhitungkan.

Untuk memudahkan perhitungan pengaruh distorsi harmonik didefinisikan beberapa ukuran kolektif, yaitu :

1. Faktor Distorsi Tegangan (VDF), dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{VDF} = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2}$$

dimana : V_1 = tegangan harmonik pertama

V_n = tegangan harmonik ke n

n = orde harmonik

2. Faktor Distorsi Arus (CDF), dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{CDF} = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2}$$

3. Faktor Interferensi Telepon (TIF), dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{TIF} = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} (W_n I_n)^2 \right)^{1/2}$$

dimana : W_n adalah " weight factor" untuk memperhitungkan efek audio dan kopling elektromagnetik pada frekwensi harmonik ke n.

4. Faktor Besaran (MF), dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{MF} = \frac{1}{V_1} \sum_{n=2}^{\infty} V_n$$

5. Distorsi harmonis total (THD), dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{THD} = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^k U_n^2 \right)^{1/2}$$

dimana : U_1 = komponen fundamental

U_n = komponen harmonik ke n

k = komponen harmonik maksimum yang diamati

3.7.1. Pengaruh harmonik terhadap transformator

Pengaruh harmonik terhadap transformator adalah :

- * bertambahnya rugi-rugi besi,
- * bertambahnya rugi tembaga.

Dimana rugi-rugi besi dapat dibedakan menjadi rugi histeresis dan rugi arus pusar. Rugi arus pusar akibat harmonik ke n adalah :

$$P_{en} = a_e (50n)^2 I_n^2$$

Dengan cara serupa, kerugian histeresis akibat harmonik ke n dapat dinyatakan dengan :

$$P_{hn} = a_h (50)^v I_n^v$$

Jika P_{e1} dan P_{h1} adalah rugi-rugi arus pusar dan histeresis pada frekwensi dasar, maka diperoleh rugi-rugi total arus pusar sebagai berikut :

$$P_{et} = P_{e1} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{n I_n}{I_1} \right)^2$$

Sedangkan rugi histeresis total adalah :

$$P_{ht} = P_{h1} \sum_{n=2}^{\infty} n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^v$$

Dari uraian diatas dapat dilihat bahwa rugi-rugi akibat arus pusar meningkat secara kuadratis terhadap frekwensi dan kerapatan medan magnet. Sedangkan rugi histeresis meningkat secara linear terhadap frekwensi dan sebanding dengan kerapatan medan magnet pangkat v, dimana v bernilai antara 1,5 sampai 2,5. Karena itu peningkatan rugi-rugi akibat arus pusar lebih dominan dibandingkan rugi akibat histeresis.

Pengaruh harmonik terhadap rugi tembaga transformator dapat dihitung besarnya dengan persamaan dibawah ini :

$$P_{cu} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} R_n I_n^2$$

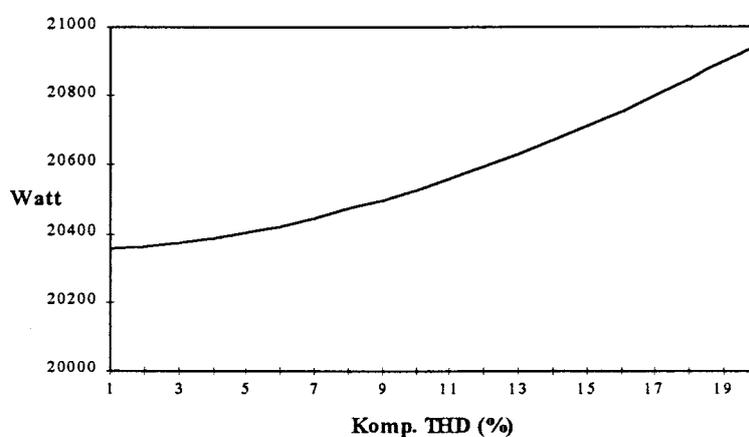
dimana : I_n = arus maksimum harmonik ke n (n=1 adalah fundamental)

R_n = tahanan transformator pada harmonik ke n

Dalam keadaan tahanan R_n konstan (tidak tergantung frekwensi), maka rugi tembaganya adalah :

$$P_{cu} = \frac{1}{2} R \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = \frac{1}{2} R I_1^2 (1 + (\text{THD})^2)$$

dimana : THD = distorsi harmonik total (total harmonic distortion).



Gambar 3.10

Peningkatan rugi-rugi daya akibat distorsi harmonik
pada transformator 10 MVA, 20kV/6,3kV

3.7.2. Pengaruh harmonik terhadap mesin listrik

Pengaruh harmonik terhadap mesin listrik adalah sebagai berikut :

- * bertambahnya rugi-rugi daya sehingga mesin bertambah panas,

* terjadi perubahan pada torsi elektromagnetik.

Misalkan arus harmonik tiga fasa seimbang mengalir pada kumparan jangkar suatu mesin listrik :

$$i_a(t) = I_n \sin(\omega_n t + \phi)$$

$$i_b(t) = I_n \sin(\omega_n t + \phi - 2n \frac{\pi}{3})$$

$$i_c(t) = I_n \sin(\omega_n t + \phi - 4n \frac{\pi}{3})$$

Kerapatan medan magnet pada suatu titik θ_m pada mesin listrik adalah :

$$B(\theta_m, t) = \frac{3k}{2} I_n \times \begin{cases} 0 & ; n = 3, 6, 9, \dots \\ \sin(n\omega t + \phi - \theta_m) & ; n = 1, 4, 7, \dots \\ \sin(n\omega t + \phi + \theta_m) & ; n = 2, 5, 8, \dots \end{cases}$$

Dari persamaan diatas dapat diamati bahwa :

1. Harmonik urutan nol ($n = 3, 6, 9, \dots$) tidak menghasilkan suatu kerapatan medan magnetik yang efektif. Arus tersebut hanya menghasilkan kerugian ohm.
2. Harmonik urutan positif ($n = 1, 4, 7, \dots$) menghasilkan medan putar searah putaran rotor dengan kecepatan $n\omega$. Kecepatan relatif terhadap rotor adalah $(n-1)\omega$ atau $(n-1+s)\omega$ untuk motor induksi dimana s =slip. Medan putar ini menghasilkan torsi searah torsi utama (fundamental). Frekwensi medan magnet ini adalah $50n$ pada stator dan $50(n-1)$ pada rotor.
3. Harmonik urutan negatif ($n = 2, 5, 8, \dots$) menghasilkan medan putar berlawanan arah putaran rotor dengan kecepatan $-n\omega$ (tanda negatif

b. Rugi gesekan dan rugi stray load

Rugi gesekan merupakan rugi yang tidak dipengaruhi oleh bentuk tegangan.

Rugi stray load meliputi :

- a. "Rotor zig-zag loss"
- b. "Stator end loss"
- c. "Rotor end loss"

c. Rugi pada kumparan stator

Rugi I^2R pada stator diberikan oleh persamaan yang biasa dan ditambah faktor tambahan untuk memperhitungkan rugi akibat arus harmonis.

$$W_1 = 3 R_1^S (I_1^S)^2 [1+(THD)^2]$$

Rugi ini bertambah besar sebagai akibat dari tegangan yang tidak sinus murni.

Tidak hanya faktor kedua yang memperbesar, tapi faktor pertama juga bertambah sebagai akibat dari bertambahnya arus magnetisasi.

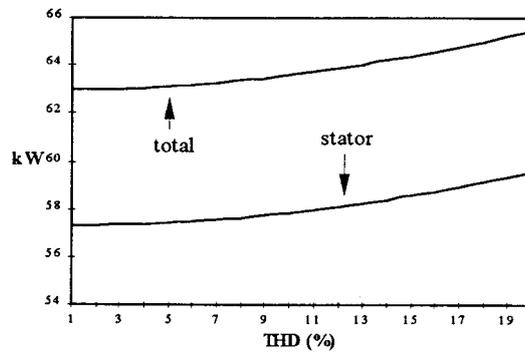
d. Rugi pada kumparan rotor akibat harmonis

Rugi harmonis rotor merupakan rugi terbesar yang diakibatkan oleh arus harmonis. Karena resistansi rotor bervariasi terhadap frekwensi maka rugi akibat dari tiap-tiap arus harmonis dihitung secara terpisah. Untuk harmonis ke k rugi diberikan sebagai berikut :

$$W_{2k} = 3 (I_k^R)^2 R_k^R$$

Jumlah dari rugi-rugi dari seluruh harmonis merupakan rugi total harmonis,

yaitu : $W_2 = 3 R_1^R (I_1^R)^2 [1+(THD)^2]$



Gambar 3.11

Peningkatan rugi stator dan rugi total akibat distorsi harmonis pada motor 1072 kW

3.7.3. Pengaruh Harmonik pada Kapasitor

Permasalahan timbulnya pada kapasitor akibat harmonik adalah :

- Menimbulkan kerugian dielektrik
- Terjadinya resonansi dengan jaringan.

Kerugian di elektrik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$P = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (\tan \delta)_n V_n^2 n \omega_c$$

Standar IEEE no 18 (C 55.1 - 1980) "Shunt Power Capacitor" menyatakan persyaratan yang harus dipenuhi untuk pemakaian kapasitor sebagai berikut :

1. Daya total akibat frekwensi dasar dan harmonik tidak melebihi 135% daya nominal.

2. Arus total kurang dari 180% arus nominal.
3. Tegangan total (rms) tidak lebih dari 110% tegangan nominal.
4. Tegangan maksimum kurang dari 120% tegangan nominal.

Impedansi jaringan dapat bervariasi antara induktif dan kapasitif sepanjang daerah frekuensi harmonik. Rangkaian impedansi jaringan yang bersifat kapasitif dapat beresonansi pada frekwensi tergantung dari nilai kapasitansi dan induksinya. Jika frekuensi resonansi rangkaian mendekati salah satu frekuensi harmonik, arus dan tegangan kapasitor dapat melebihi batas pembebanannya.

3.7.4. Pengaruh Harmonik Terhadap Peralatan Pemutus

Harmonik dapat menyebabkan meningkatnya nilai di/dt pada saat gelombang arus mencapai nol. Akibatnya laju kenaikan "Transient Recovery Voltage" (TRV) pada saat pemutusan menjadi lebih tinggi dari keadaan normal. Hal ini dapat menyebabkan kegagalan pemutusan.

Harmonik juga dapat menyebabkan pergeseran saat perpotongan gelombang arus dengan sumbu nol (zero crossing point). Saat perpotongan tersebut mempengaruhi nilai puncak dari "Transient Recovery Voltage". Misalnya, jika saat perpotongan tersebut bersamaan dengan saat tegangan supply mencapai maksimum, nilai puncak TRV mencapai $2,88 E$ (E =tegangan supply rms). Keadaan ini juga dapat menyebabkan kegagalan pemutusan.

3.7.5. Pengaruh Harmonik Terhadap Nilai Pengaman

Harmonik dapat mempengaruhi kerja relai terutama relai-relai yang bekerjanya tergantung pada nilai puncak tegangan/arus atau saat titik potong tegangan dengan sumbu nol. Relai-relai elektromagnetik dapat terpengaruh karakteristik penundaan waktunya (time delay karakteristik) akibat adanya komponen-komponen torsi harmonik.

Sedangkan arus tanah (ground fault relay) pada umumnya tidak dapat membedakan antara arus gangguan tanah dengan arus-arus komponen harmonik urutan nol (kelipatan tiga).

Kandungan arus-arus harmonik yang tinggi dapat menyebabkan relai bekerja. Pengaruh harmonik pada relai diantaranya adalah sebagai akibat :

1. Relai cenderung bekerja lebih cepat atau lebih lambat dari semestinya.
2. Relay frekuensi bawah nominal cenderung mengalami perubahan karakteristik kerja.
3. Harmonik dapat mengacaukan kerja relai-relai diferensial dengan kecepatan tinggi.
4. Waktu kerja relai dapat berubah.

3.8. Ketidakseimbangan Tegangan

Ketidakseimbangan tegangan pada sistem distribusi 3 fasa umumnya diakibatkan oleh adanya beban 1 fasa yang besar pada saluran sistem 3 fasa. Adakalanya ketidakseimbangan tegangan diakibatkan oleh kesalahan pada

hubungan tap dari trafo distribusi, tegangan supply yang tidak stabil, penyambungan power supply yang jelek, sistem transformator open delta, problem pada motor sendiri atau tidak sempurnanya kapasitor.

Jika tegangan yang diberikan pada motor 3 fasa tidak tepat sama, maka ketidakseimbangan arus menyebabkan terjadinya tegangan negatif sequence. Tegangan urutan negatif ini memiliki rotasi yang berlawanan dengan tegangan yang seimbang. Ketidakseimbangan tegangan menimbulkan fluks negatif sequence yang menyebabkan ketidakseimbangan arus jauh lebih besar dibanding saat kondisi tegangan seimbang. Ketidakseimbangan tegangan ini akan sangat dirasakan oleh beban-beban yang terhubung pada titik sambung bersama.

3.8.1. Rugi daya pada transformator

Misalkan \bar{E}_{su} gaya gerak listrik yang simetris dari fasa U, \bar{E}_{sv} gaya gerak listrik dari fasa V dan \bar{E}_{sw} gaya gerak listrik dari fasa W. Tentu dimisalkan, bahwa pengisian dilakukan dari jala-jala yang simetris tegangannya, maka jelas bahwa :

$$\begin{aligned} \bar{E}_{su} &= \bar{E}_u + \bar{E}_b \\ \bar{E}_{sv} &= \bar{E}_v + \bar{E}_b \\ \bar{E}_{sw} &= \bar{E}_w + \bar{E}_b \\ \hline -3\bar{E}_b &= \bar{E}_u + \bar{E}_v + \bar{E}_w \end{aligned} \quad +$$

Dari persamaan di atas, bilamana jumlah daripada \bar{E}_u , \bar{E}_v dan \bar{E}_w tidak nol, maka ketiga tegangan fasa adalah tidak sama.

Dalam hal sistem tegangan berupa sistem simetris tiga fasa, maka ketiga tegangan fasa berbeda masing-masing 120 derajat. Demikian pula untuk gelombang-gelombang dasar daripada arus fasa, yaitu :

$$i_{1u} = I_{1u} \sin (\omega t - \phi_1)$$

$$i_{1v} = I_{1v} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \phi_1 \right)$$

$$i_{1w} = I_{1w} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \phi_1 \right)$$

Untuk komponen harmonik ke tiga :

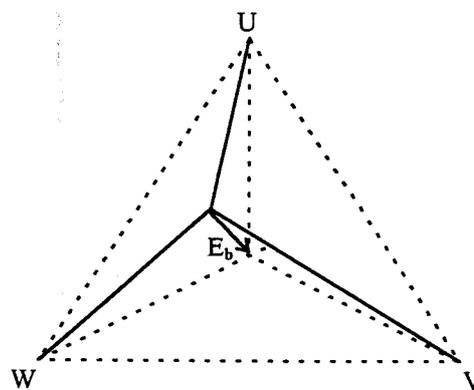
$$i_{3u} = I_{3u} \sin (3\omega t - \phi_3)$$

$$i_{3v} = I_{3v} \sin \left(3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \phi_3 \right)$$

$$i_{3w} = I_{3w} \sin \left(3 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) - \phi_3 \right)$$

Demikian pula halnya dengan komponen-komponen harmonisa yang lebih tinggi.

Metode titik bintang dapat disamakan dengan penjumlahan secara vektor biasa, dengan syarat tanpa memperhitungkan besar sudut phasa tegangan dan arus pada titik bintang.



Gambar 3.12¹⁸

Vektor tegangan titik bintang

¹⁸ Abdul Kadir, "Transformator", Pradnya Paramita, Cetakan kedua, 1981, hal 9

Dalam hal sistem tegangan berupa sistem simetris tiga fasa, maka ketiga tegangan fasa berbeda masing-masing 120 derajat. Demikian pula untuk gelombang-gelombang dasar daripada arus fasa, yaitu :

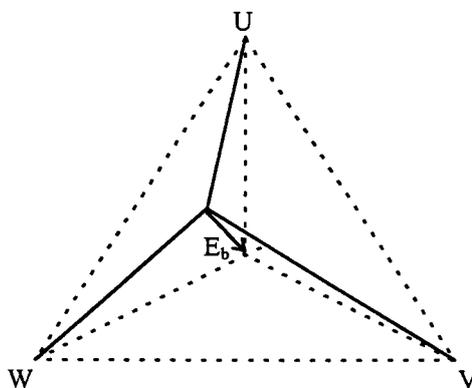
$$\begin{aligned}i_{1u} &= I_{1u} \sin (\omega t - \phi_1) \\i_{1v} &= I_{1v} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \phi_1 \right) \\i_{1w} &= I_{1w} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \phi_1 \right)\end{aligned}$$

Untuk komponen harmonik ke tiga :

$$\begin{aligned}i_{3u} &= I_{3u} \sin (3\omega t - \phi_3) \\i_{3v} &= I_{3v} \sin \left(3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \phi_3 \right) \\i_{3w} &= I_{3w} \sin \left(3 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) - \phi_3 \right)\end{aligned}$$

Demikian pula halnya dengan komponen-komponen harmonisa yang lebih tinggi.

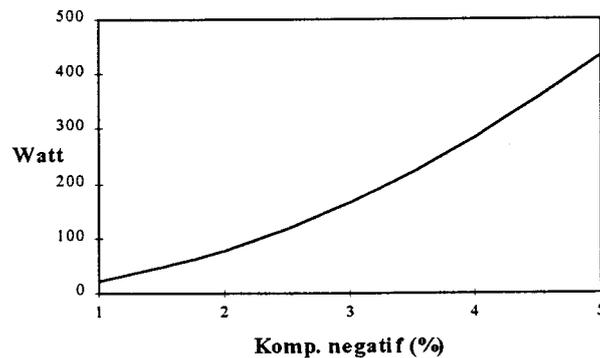
Metode titik bintang dapat disamakan dengan penjumlahan secara vektor biasa, dengan syarat tanpa memperhitungkan besar sudut phasa tegangan dan arus pada titik bintang.



Gambar 3.12¹⁸

Vektor tegangan titik bintang

¹⁸ Abdul Kadir, "Transformator", Pradnya Paramita, Cetakan kedua, 1981, hal 9



Gambar 3.13

Pertambahan rugi daya akibat ketidakseimbangan tegangan pada transformator 10MVA, 20kV/6,3kV

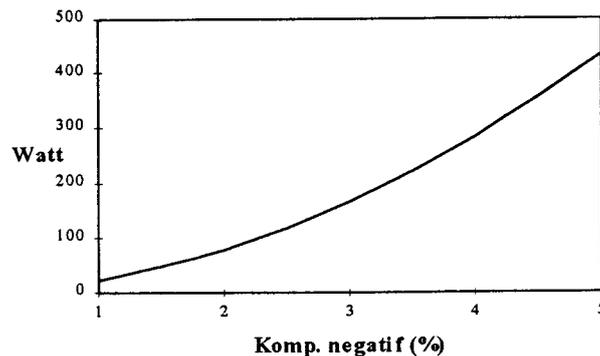
3.4.2. Rugi daya pada motor induksi

Arus 3 fasa seimbang yang mengalir dalam kumparan dengan beda sudut yang sesuai akan dapat menghasilkan intensitas medan magnet berputar yang terdistribusi sinusoidal dengan kecepatan ditentukan oleh frekwensi dari arus tersebut.

Analisa dari motor induksi 3 fasa pada kondisi tegangan yang tidak seimbang dilakukan dengan menyatakan tegangan yang tidak seimbang menjadi komponen positif sequence dan komponen negatif sequence yaitu seperti sebagai berikut :

$$E_p = \frac{(E_a + E_b + E_c)}{3}$$

$$E_n = \frac{\left[\left(E_a - \frac{E_b}{2} - \frac{E_c}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} E_b - \frac{\sqrt{3}}{2} E_c \right)^2 \right]^{1/2}}{3}$$



Gambar 3.13

Pertambahan rugi daya akibat ketidakseimbangan tegangan pada transformator 10MVA, 20kV/6,3kV

3.4.2. Rugi daya pada motor induksi

Arus 3 fasa seimbang yang mengalir dalam kumparan dengan beda sudut yang sesuai akan dapat menghasilkan intensitas medan magnet berputar yang terdistribusi sinusoidal dengan kecepatan ditentukan oleh frekwensi dari arus tersebut.

Analisa dari motor induksi 3 fasa pada kondisi tegangan yang tidak seimbang dilakukan dengan menyatakan tegangan yang tidak seimbang menjadi komponen positif sequence dan komponen negatif sequence yaitu seperti sebagai berikut :

$$E_p = \frac{(E_a + E_b + E_c)}{3}$$

$$E_n = \frac{\left[\left(E_a - \frac{E_b}{2} - \frac{E_c}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} E_b - \frac{\sqrt{3}}{2} E_c \right)^2 \right]^{1/2}}{3}$$

Masing-masing komponen diterapkan pada rangkaian ekuivalen yang bersangkutan sehingga diperoleh arus-arus positif sequence maupun negatif sequence.

Slip rotor s didefinisikan sebagai :

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Komponen negatif sequence membangkitkan medan berputar dengan arah berlawanan. sehingga slip akibat negatif sequence s' diperoleh sebagai berikut :

$$\begin{aligned} s' &= \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 1 + \frac{\omega_r}{\omega_s} \\ &= 2 - \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 2 - s \end{aligned}$$

dimana s adalah slip akibat positif sequence.

Pada pembahasan dilakukan perbandingan pemakaian daya dari suatu motor induksi 3 fasa untuk suatu kondisi slip tertentu pada kondisi tegangan seimbang dan dengan adanya ketidakseimbangan tegangan.

Pada pembahasan dilakukan perbandingan pemakaian daya dari suatu motor induksi 3 fasa untuk suatu kondisi slip tertentu pada kondisi tegangan seimbang dan dengan adanya ketidakseimbangan tegangan.

$$T_{ep} = \frac{3}{\omega_s} E_p^2 \frac{\frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_{2s}')^2}$$

$$T_{en} = \frac{3}{\omega_s} E_n^2 \frac{\frac{r_2'}{(2-s)}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{(2-s)}\right)^2 + (x_1 + x_{2s}')^2}$$

Bab IV

SIMULASI PENINGKATAN KUALITAS ENERGI LISTRIK DI PT. SEMEN GRESIK (PERSERO) TUBAN I

Pada bab ini akan dibahas dan disimulasikan besar pemakaian daya tiap jam pada industri, baik pada saat kualitas tenaga listrik baik maupun tidak. Dengan studi kasus beban industri pada pabrik semen PT. Semen Gresik (Persero) Proyek Tuban I. Metode yang digunakan ialah metode aliran daya teknik topologi dengan jaringan distribusi radial.

Simulasi dilakukan berdasarkan kondisi operasi yang pernah terjadi pada sistem kelistrikan di PT. Semen Gresik (Persero) Tuban I, dimana data/kondisi operasi dicatat dengan selang waktu satu jam. Data yang digunakan dalam simulasi ini diambil dari catatan pada laporan Harian "Main Substation". Berdasarkan Laporan Harian tanggal 5 Desember 1995, tercatat nilai faktor daya terburuk yang pernah terjadi yaitu sebesar 0,66 lagging selama 4 jam sejak pukul 07.00 hingga pukul 11.00. Sedangkan untuk fluktuasi tegangan, pada tanggal 5 Desember 1995 tercatat tegangan terendah yang pernah terjadi yaitu 141 kV selama 3 jam.

Sebelum filter harmonik/kompensator daya reaktif dipasang, tercatat hasil pengukuran harmonisa terbesar yang dilakukan pada tanggal 18 Desember 1995, yaitu THD tegangan di Sub Station 1 (20 kV) sebesar 3%.

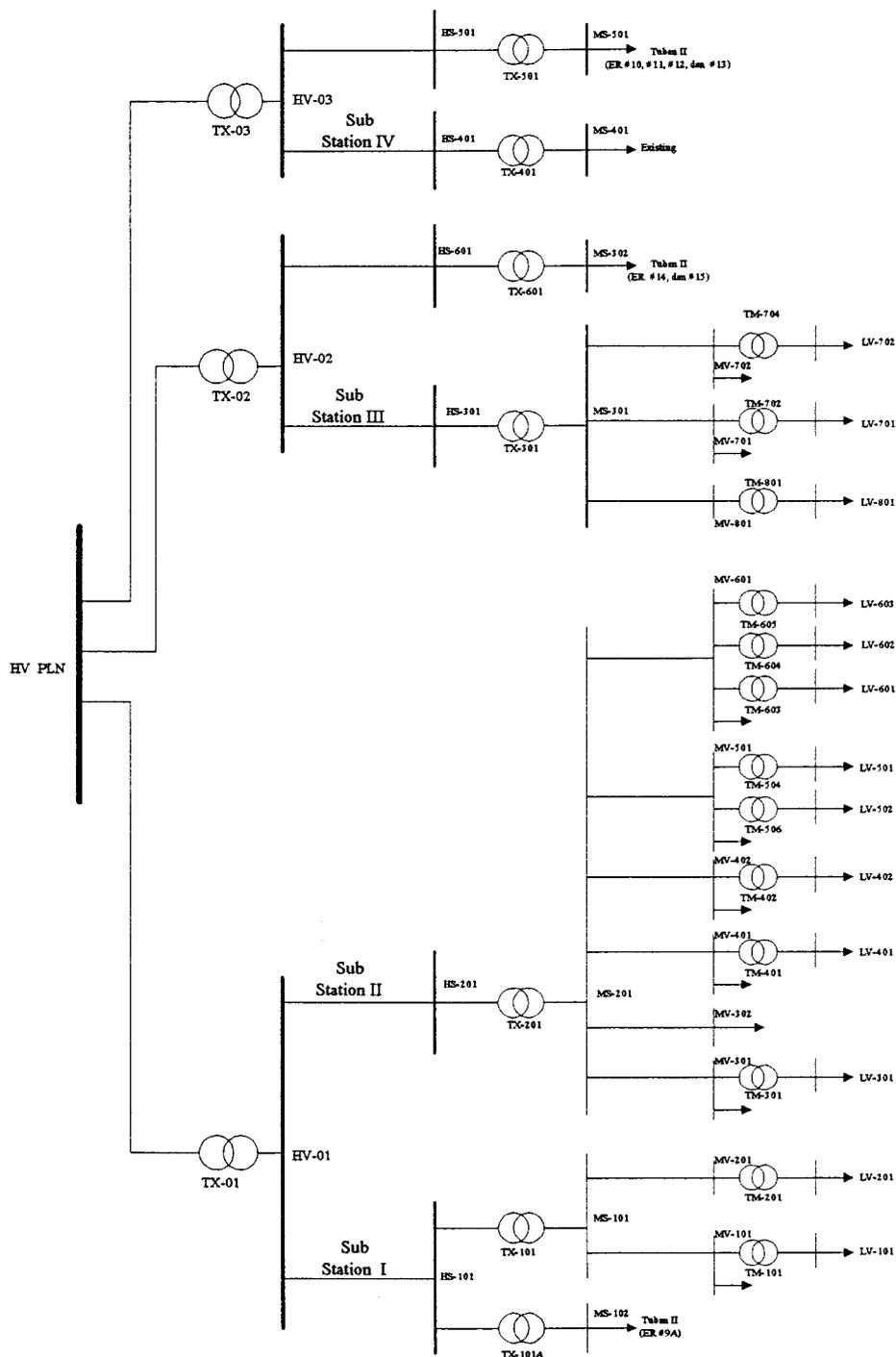
4.1. Sistem kelistrikan di PT. Semen Gresik (Persero) Tuban I

Sumber tenaga listrik PT. Semen Gresik (Persero) Tuban I berasal dari jala-jala PLN dengan kapasitas daya sebesar 2 x 50 MVA pada jaringan 150kV.

Tabel 4.1.

Data impedansi jaringan

BUS		Saluran	Impedansi (pu)
dari	ke		
HV PLN	HV 01	1	(.0001, .0003)
HV PLN	HV 02	2	(.0001, .0002)
HV PLN	HV 03	3	(.0001, .0002)
HV 01	HS 101	4	(.0011, .0022)
HV 01	HS 201	5	(.0008, .0017)
HV 02	HS 301	6	(.0012, .0024)
HV 02	HS 601	7	(.0012, .0024)
HV 03	HS 401	8	(.0003, .0006)
HV 03	HS 501	9	(.0003, .0007)
HS 101	MS 102	10	(.0002, .0003)
HS 101	MS 101	11	(.0002, .0003)
HS 201	MS 201	12	(.0001, .0001)
HS 301	MS 301	13	(.0001, .0003)
HS 601	MS 302	14	(.0001, .0002)
HS 401	MS 401	15	(.0002, .0003)
HS 501	MS 501	16	(.0001, .0002)
MS 101	MV 101	17	(.0153, .0014)
MS 101	MV 201	18	(.0155, .0553)
MS 201	MV 301	19	(.0062, .0212)
MS 201	MV 302	20	(.0062, .0212)
MS 201	MV 401	21	(.0133, .0457)
MS 201	MV 402	22	(.0133, .0457)
MS 201	MV 501	23	(.0037, .0127)
MS 201	MV 601	24	(.0062, .0212)
MS 301	MV 801	25	(.0163, .0559)
MS 301	MV 701	26	(.0016, .0053)
MS 301	MV 702	27	(.0016, .0054)
MV 101	LV 101	28	(.1051, .1428)
MV 201	LV 201	29	(.0966, .1362)
MV 301	LV 301	30	(.0900, .1286)
MV 401	LV 401	31	(.0784, .1110)
MV 402	LV 402	32	(.0526, .0744)
MV 501	LV 501	33	(.1754, .2411)
MV 501	LV 502	34	(.0768, .1084)
MV 601	LV 601	35	(.0667, .0938)
MV 601	LV 602	36	(.0663, .0935)
MV 601	LV 603	37	(.0803, .1097)
MV 801	LV 801	38	(.0016, .0013)
MV 701	LV701	39	(.0404, .0568)
MV 702	LV 702	40	(.1287, .1839)



Gambar 4.1.

Single line diagram dari sistem kelistrikan pada pabrik Semen Tuban I

Data impedansi jaringan dan single line diagram dari sistem kelistrikan pabrik Semen Tuban I dapat dilihat pada tabel 4.1 dan gambar 4.1. Besaran p.u. dihitung berdasarkan base daya 50 MVA dan base tegangan 150 kV; 20 kV; 6,3 kV; 0,4 kV yaitu sesuai dengan sistem tegangan yang dipakai pada masing-masing area proses produksi.

Jaringan distribusi yang digunakan di pabrik Semen Tuban I ini adalah jaringan distribusi radial dengan bus PLN sebagai bus sumber. Sedangkan untuk mempermudah dalam pengoperasiannya, sistem jaringan dibagi dalam 2 bagian main station (Tuban II merupakan bagian yang terpisah) dan 4 sub station, seperti pada gambar 4.1.

Beban kelistrikan di pabrik Semen Tuban I yang mempunyai kapasitas produksi 2,3 juta ton semen pertahun, dibagi sesuai dengan tahapan area proses produksi. Tabel 4.2. di bawah ini akan menunjukkan pembagian beban berdasarkan operating kW dari peralatan pada sistem kelistrikan pabrik Semen Tuban I.

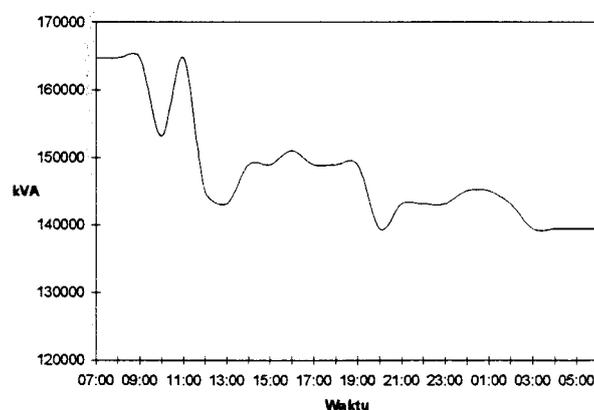
Tabel 4.2.

Pembagian beban berdasarkan Electrical Room

ER	SS	Area	Beban		
			MV	LV	Total
1	I	Limestone Crusher	2172,83	713,98	2886,81
2	I	Limestone Crusher	0,00	966,31	966,31
3A	II	Roller Mill	3924,08	1515,98	5440,06
3B	II	Roller Mill	6467,90	0,00	7754,06
4A	II	Blending	1286,16	1102,09	2388,25
4B	II	Coal Mill	1164,06	1202,16	2366,22
5	II	Kiln Feed & EP	3617,39	1647,82	5265,21
6	II	Bumer & Cooler	531,36	3416,99	3948,35
7	III	Clinker Grinding	12424,35	2549,96	14974,31
8	III	Packing	0,00	1398,92	1398,92

Dari tabel pembagian beban diatas dapat dilihat bahwa beban terbagi dalam tiap-tiap Electrical Room, pada level bus 6,3 kV (bus MV) dan 0,4 kV (bus LV). Sedangkan operating kW dari masing-masing peralatan didasarkan pada operasi normal dari peralatan tersebut.

Proses produksi dari pabrik Semen Tuban I ini tidaklah berjalan berurutan, dilihat dari penggunaan mesin-mesin induksi sebagai motor penggerak. Dimana mesin-mesin tersebut tidak bekerja terus-menerus selama 24 jam dalam satu hari. Melainkan ada interval waktu dalam pengoperasiannya. Seperti halnya di dalam area Limestone Crusher, mesin induksi 231 CR1M01 dengan daya maksimum 1072 kW digunakan untuk memecah batu-batu kapur, dan kemudian hasil akhirnya akan disimpan di dalam silo-silo penyimpanan. Jika silo-silo tersebut telah penuh maka proses penghancuran tersebut akan dihentikan, yang berakibat mesin induksi 231 CR1M01 akan mati.



Gambar 4.2.

Kurva beban harian tanggal 5 Desember 1995

Namun dalam simulasi ini, diasumsikan masing-masing area produksi beroperasi penuh selama 24 jam dalam satu hari yang tujuannya adalah untuk memudahkan perhitungan dan membandingkan hasilnya apabila kualitas energi listriknya diperbaiki. Juga mesin-mesin induksi dioperasikan normal sesuai faktor bebannya.

4.2. Perbaikan Faktor daya

Faktor daya bergantung pada jenis mesin listrik yang digunakan. Sebagian besar mesin-mesin listrik yang digunakan di industri memiliki faktor daya yang rendah, yang berarti penyedia jasa kelistrikan harus membangkitkan daya lebih besar lagi dari yang diperlukan secara teoritis. Yang berarti pula, transformator dan saluran transmisi juga harus menanggung arus yang lebih besar. Ketika faktor daya sistem secara keseluruhan adalah kecil, sistem tersebut akan menjadi tidak efisien dan biaya pengoperasiannya menjadi tinggi. Untuk mengatasi ini, dan juga untuk menjadikan generator, transformator, dan saluran tidak berlebihan dalam menanggung beban arus ini, maka penyedia jasa kelistrikan mengharuskan konsumennya untuk memperbaiki faktor dayanya, atau memberikan denda penalti untuk faktor daya yang rendah.

Peralatan listrik yang memiliki faktor daya yang rendah, diantaranya adalah sebagai berikut :

- a) motor-motor induksi,
- b) peralatan elektronika daya,

- c) mesin las (welding machine),
- d) busur dan tanur listrik,
- e) lampu pendar.

Untuk industri yang banyak menggunakan peralatan-peralatan listrik seperti diatas akan mengalami penurunan faktor daya yang cukup besar. Tabel 4.3. di bawah ini menunjukkan faktor daya pada jenis-jenis industri tertentu.

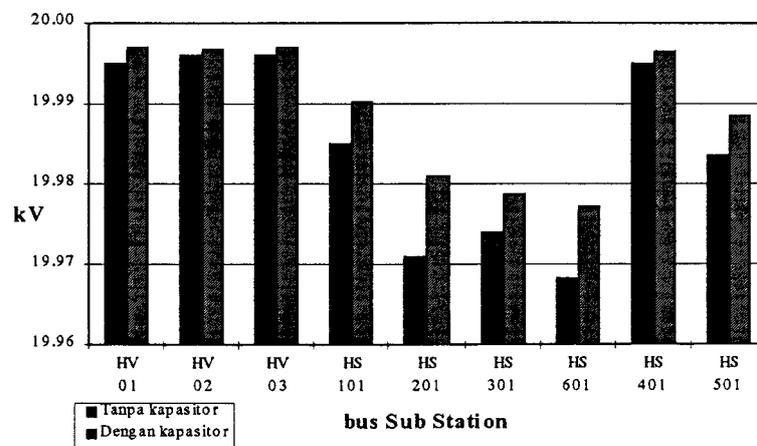
Metode yang dapat digunakan untuk memperbaiki faktor daya adalah dengan memberikan daya reaktif (kvar) ke dalam sistem. Daya ini dapat diperoleh dari mesin sinkron dengan penguatan berlebih maupun dengan kapasitor statis.

Tabel 4.3
Faktor daya pada beberapa industri

No.	Jenis industri	Faktor daya
1.	Tekstil	0,65 - 0,75
2.	Kimia	0,75 - 0,85
3.	Las busur	0,40 - 0,65
4.	Dapur busur	0,35 - 0,40
5.	Pabrik semen	0,75 - 0,80
6.	Pabrik pakaian	0,35 - 0,60
7.	Pabrik bir	0,75 - 0,86
8.	Pabrik baja	0,60 - 0,85
9.	Percetakan	0,55 - 0,70

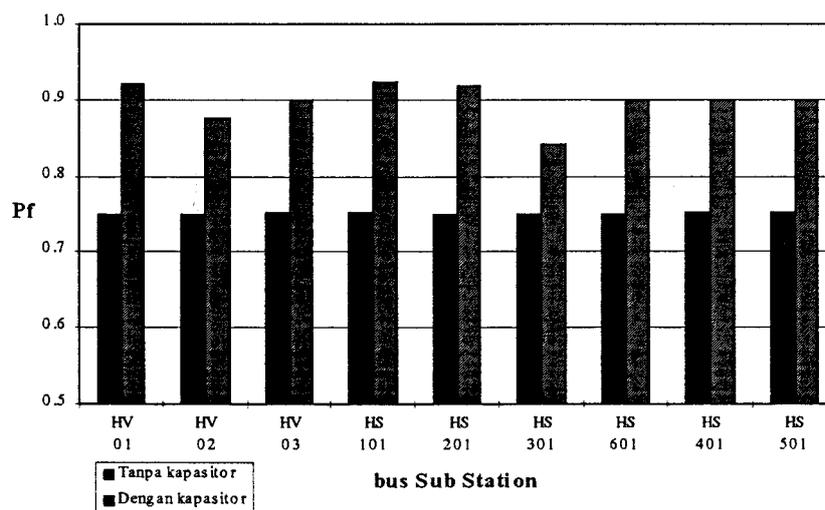
Pada simulasi ini, dilakukan perhitungan aliran daya pada semua saluran dari sistem kelistrikan di pabrik Semen Tuban I dengan beban-beban peralatan dioperasikan dalam keadaan normal. Pada kasus pertama, ketika kapasitor bank tidak terpasang, sedang kasus kedua ketika kapasitor bank dalam keadaan

terpasang. Ketika kapasitor bank tidak terpasang, faktor daya yang terjadi pada sistem adalah rendah, dan rugi-rugi daya penyaluran yang harus ditanggung oleh sistem menjadi besar.



Gambar 4.3.

Perbandingan tegangan pada bus-bus Sub Station
karena perbaikan faktor daya



Gambar 4.4.

Perbandingan faktor daya pada bus Sub Station
karena perbaikan faktor daya

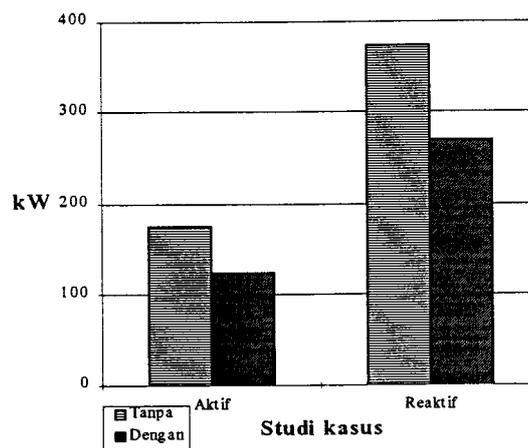
Dari gambar 4.4 terlihat bahwa terjadi kenaikan faktor daya pada bus-bus Sub Station karena pemasangan kapasitor bank.

Sedangkan untuk rugi daya penyaluran dapat dilihat pengaruh dari perbaikan faktor daya pada tabel 4.4. dibawah ini.

Tabel 4.4.
Perbandingan rugi daya
penyaluran karena perbaikan faktor daya

Studi kasus	Rugi penyaluran	
	Aktif (kW)	Reaktif (kVar)
Tanpa	174.3470	372.9984
Dengan	124.4042	270.6656

Dengan turunnya beban reaktif terpasang dari sistem secara keseluruhan, maka rugi daya aktif di saluran akan turun lebih dari 25%.



Gambar 4.5.
Penurunan rugi daya di saluran karena
perbaikan faktor daya

IV.3. Penurunan Tegangan

Dalam simulasi ini digunakan perhitungan aliran daya dengan memperhitungkan perubahan rugi-rugi daya pada beban motor dan transformator dengan adanya perubahan tegangan. Untuk itu, terlebih dahulu dilakukan perhitungan aliran daya untuk keadaan normal, dimana semua peralatan masih beroperasi normal pada daerah tegangan yang diijinkan. Sehingga rugi-rugi peralatan (dalam hal ini transformator dan motor tegangan menengah) bisa diabaikan. Simulasi dilakukan untuk penurunan tegangan Gardu Induk utama (150 kV) dari 1% sampai dengan 10%. Hasil simulasi menunjukkan adanya kenaikan daya yang diserap sistem karena kenaikan rugi daya pada transformator Main Station seperti terlihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5.

Daya yang diserap oleh sistem akibat ketidakstabilan tegangan.

Penurunan (%)	Daya Aktif (kW)	Rugi daya Aktif (kW)
0	108726.00	124.40
1	108829.30	124.67
2	108904.40	124.80
3	108998.70	125.02
4	109096.40	125.23
5	109197.20	125.45
6	109303.00	125.69
7	109412.20	125.93
8	109525.50	126.19
9	109643.20	126.45
10	109755.50	126.66

IV.4. Distorsi harmonik

Simulasi akibat adanya distorsi harmonik dilakukan dengan mengukur faktor distorsi harmonik pada bus tersebut. Kemudian dari hasil pengukuran dilakukan perhitungan pertambahan rugi-rugi daya akibat distorsi tersebut.

Tabel 4.6.
Kenaikan rugi daya yang diserap sistem akibat distorsi harmonik

Electrical Room	THD (%)	Tambahan Rugi daya
ER#1	2.00	8665.79
231CR1	2.50	8413.55
		62996.62
ER#3A	1.80	98959.20
ER#3B	1.50	79315.32
		79315.32
ER#4B	1.70	35129.16
		32906.79
ER#4A	2.00	21046.80
		21046.80
421BL6	2.30	21049.51
ER#5		
441FN1	8.50	13874.67
441FN2	8.10	13865.53
ER#6		
441FNQ		10730.74
ER#7		
542FN7		31137.21
542MM1		114220.01
Total		652673.03

IV.5. Ketidakseimbangan Tegangan

Sebuah sistem tenaga 3 fasa yang seimbang berarti sistem tersebut mendapatkan suplai tegangan dan arus 3 fasa yang seimbang dan dibebani oleh

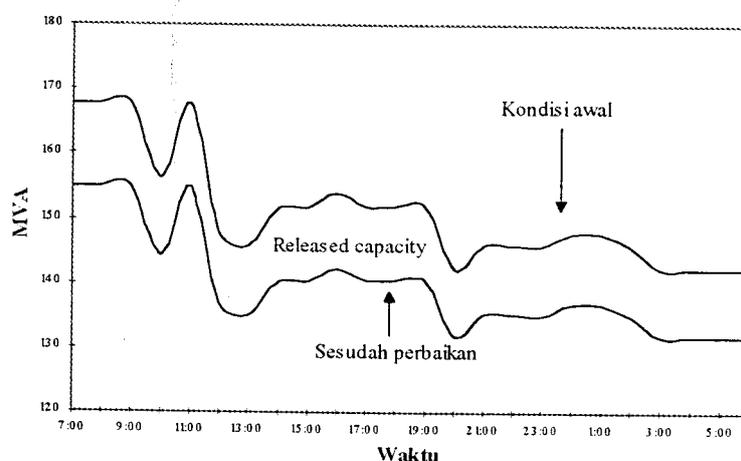
beban 3 fasa yang seimbang pula (termasuk didalamnya impedansi saluran). Namun ada kalanya terjadi ketidakseimbangan tegangan pada sistem tersebut, yang bisa disebabkan oleh tegangan sumber yang tidak seimbang maupun dari kesalahan pembebanan 1 fasa yang terlalu besar pada saluran sistem tersebut.

Hasil pengukuran di lapangan tidak menemukan adanya ketidak seimbangan tegangan.

4.6. Hasil Simulasi Pemakaian Energi Listrik

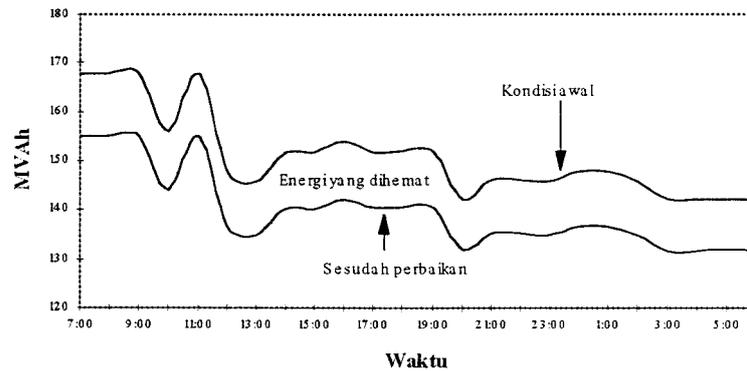
4.6.1. Perbaikan Faktor Daya

Pada simulasi ini dilakukan perbaikan kualitas energi listrik pada kondisi operasi berdasarkan Laporan Harian tanggal 5 Desember 1995. Hasil simulasi peningkatan faktor daya diberikan pada gambar 4.6, yang menunjukkan besar “released capacity” yang diperoleh dan gambar 4.7 yang menunjukkan penghematan energi yang diperoleh dari simulasi.



Gambar 4.6.

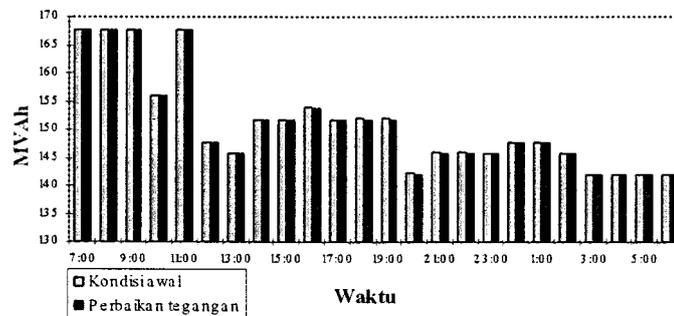
Released capacity yang diperoleh dari hasil simulasi



Gambar 4.8.

Released capacity yang diperoleh dari hasil simulasi

4.6.2. Perbaikan Tegangan



Gambar 4.7.

Perbandingan pemakaian daya untuk perbaikan tegangan

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa perbaikan tegangan tidak ada pengaruhnya terhadap penghematan pemakaian energi.

4.6.3. Perbaikan Faktor Daya dan Tegangan

Pada simulasi ini, dilakukan perbaikan faktor daya dan perbaikan tegangan. Penghematan energi yang diperoleh sama seperti pada simulasi perbaikan faktor daya.

4.6.4. Distorsi harmonik

Dengan mengasumsikan distorsi harmonis yang terjadi selama 24 jam adalah tetap seperti yang terlihat pada tabel 4.4, maka pemakaian energi listrik bertambah sebesar 15,66 MWh.

Bab V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari analisis dan simulasi yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Dengan memperbaiki faktor daya, akan diperoleh “released capacity” atau perubahan beban bisa dilakukan tanpa peningkatan kapasitas daya, dan penurunan rugi-rugi daya sistem (penghematan energi).
2. Penurunan tegangan yang terjadi tidak berpengaruh terhadap peningkatan energi yang diserap dari sistem.
3. Harmonik yang ada dalam sistem akan meningkatkan rugi-rugi daya pada peralatan yang terhubung pada sistem tersebut.
4. Ketidakseimbangan tegangan pada sistem akan meningkatkan rugi-rugi daya pada peralatan yang dicatu oleh sistem tersebut.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa peningkatan kualitas energi listrik berpengaruh terhadap pemakaian energi total pada sistem kelistrikan tersebut.

5.2. Saran-Saran

Dari pembahasan tugas akhir ini, dapat disarankan :

1. Pemasangan kompensator pada industri, khususnya pada industri yang mempunyai faktor daya rendah, sangat berguna untuk menekan rugi-rugi daya pada komponen beban dalam industri.
2. Walaupun turun naiknya tegangan tidak berpengaruh terhadap penghematan energi, namun karena banyaknya peralatan listrik yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan, maka penggunaan transformator pengubah penyadap berbeban (on load tap changer) dapat mengurangi deviasi perubahan tegangan.
3. Penggunaan "power conditioners" dapat memperbaiki kualitas energi listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Burke, James J. , Griffith, David C. , Ward, Daniel J. , "Power Quality - Two Different Perspectives", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990.
- Hermawanto, B. , "Phenomena Harmonik di Sistem Distribusi Tenaga Listrik : Masalah, Penyebab dan Usaha Mengatasinya", ENERGI & LISTRIK, Volume VI No. 2, Juni 1996.
- Klingshirn, E.A. , Jordan, H.E., "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Source", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-87, No.3, March 1968.
- Lamarre, L. , "Tackling Power Quality Issues on Both Sides of The Meter", EPRI Journal, July/August 1991.
- Penangsang, O. , "Simulasi Harmonik Untuk Mengetahui Tingkat Distorsi Paa Sistem Tenaga Listrik", Laporan penelitian, Lembaga Penelitian ITS, 1992.
- Penangsang, O. , Budi K. , "Pengaruh Kualitas Energi Listrik Terhadap Penghematan Energi Pada Beban Industri", Laporan Penelitian, Lembaga Penelitian ITS, 1995.
- Singh, Tejinder P. , Risser, Roland J. , Krein, Steven D. , "Power Quality Aspects of Energy Efficiency : What Is At Stake ?", Pacific Gas and Electric Company, R & D, San Ramon, CA, 1992.
- Susanto, D. , Hermawanto, B. , "Evaluasi Mutu Listrik Pada Sistem Kelistrikan Jawa Bali", Seminar Nasional Tenaga Listrik di ITB Bandung, 1 - 4 Februari 1993.
- Wardhani, "Pengaruh Beban Industri Pada Mutu Tenaga Listrik", ENERGI & LISTRIK, Volume VI, No. 2, Juni 1996.

Special Thanks for Special Guys

- ☺ Untuk seseorang yang “nun jauh di mato” tapi selalu di hati. Gapailah cita-citamu.....
- ☺ Untuk penghuni Sutorejo Utara VII/33 : Putu “Belong”, Tude “FM”, Kadek “Pasek”, Kadek “Wahyudi”, Nyoman “Mantus”, dan Si Mbah yang telah setia menemaniku.
- ☺ Untuk teman terbaikku satu-satunya Didit. Terima kasih atas omelanmu, Dit.
- ☺ Untuk “Three Musketeer” : **Iwan “Bondy”** dan **Agus “Siwur”**. Kalian telah membuatku selalu tabah sampai akhir.
- ☺ Untuk Yayasan Crew : Mas Rudy “Dumirin”, Mas Muklis “Jack”, Mas Surani “Cak Sur” dan Mas Gendon yang telah hilang. Terima kasih banyak atas dukungan dan bantuannys selama ini.
- ☺ Untuk Power E-31 yang telah mendahului menghilang dari peredaran. Anys “Kuli”, Daniel “SupreMe”, Rachman “Bregos”, Cak Green, Andiek “Boncu”, Triono “Sarcholed”, dan lainnya (Sorry, lupa...)
- ☺ Untuk Power-31 yang masih mengorbit di sini. Saya tunggu kehadiranmu di luar orbit.
- ☺ Untuk UB 40 (40 anak utun) di PKDST. Sampai sekarang pendaftaran untuk menjadi anggota UB 40 masih dibuka, sebab masih kekurangan orang.
- ☺ Untuk Adhi “Giant”, Udin “Boy”, Laeli, Andri, Klewes, Sholeh dan Power’92 lainnya.
- ☺ Semua teman-teman yang belum disebutkan, maaf soalnya terburu-buru sehingga lupa.