

**TAPIS PARALEL PASIF  
UNTUK MENGURANGI DISTORSI HARMONIK  
BEBAN TAKLINEAR:  
Pemodelan, Analisis, dan Desain**

**T e s i s**

untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S-2

Program Studi Teknik Elektro  
Jurusan Ilmu-ilmu Teknik



diajukan oleh:

**Sabar Nababan**  
13133/I-1/1249/99

kepada

**PROGRAM PASCASARJANA  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA  
2001**

**TAPIS PARALEL PASIF  
UNTUK MENGURANGI DISTORSI HARMONIK  
BEBAN TAKLINEAR:  
Pemodelan, Analisis, dan Desain**

**T e s i s**

untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S-2

Program Studi Teknik Elektro  
Jurusan Ilmu-ilmu Teknik



diajukan oleh:

**Sabar Nababan**  
13133/I-1/1249/99

kepada

**PROGRAM PASCASARJANA  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA  
2001**

# Tesis

## TAPIS PARALEL PASIF UNTUK MENGURANGI DISTORSI HARMONIK BEBAN TAKLINEAR: Pemodelan, Analisis, dan Desain

dipersiapkan dan disusun oleh

**Sabar Nababan**

telah dipertahankan di depan Dewan Penguji

**26 November 2001**

pada tanggal

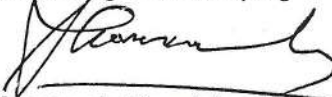
### Susunan Dewan Penguji

Pembimbing Utama



Prof. Adhi Susanto, M.Sc., Ph.D.

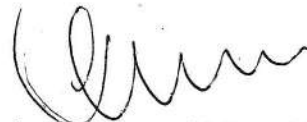
Pembimbing Pendamping I



Ir. Hamzah Berahim, MT.

Pembimbing Pendamping II

Anggota Dewan Penguji Lain



Ir. Tumiran, M.Eng., Ph.D.



Ir. T. Haryono, M.Sc.



Ir. Soedjatmiko, M.Sc.

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Magister

**26 November 2001**

Tanggal



Ir. F. Soesianto, B.Sc.E., Ph.D.

Pengelola Program Studi : ..... **Teknik Elektro**



## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 26 November 2001



Sabar Nababan  
13133/I-1/1249/99

## PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan kasih karuniaNya, sehingga tesis ini, yang berjudul **"Tapis Paralel Pasif untuk Mengurangi Distorsi Harmonik Beban Taklinear: Pemodelan, Analisis, dan Desain"**, dapat diselesaikan.

Penulis menyadari bahwa dengan keterbatasan pengetahuan yang dimiliki, tentunya tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, maka dengan hati terbuka penulis menantikan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan tesis ini.

Penyusunan dan penulisan tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Mulyadi, Apt., sebagai Direktur Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
2. Bapak Ir. F Soesianto, B.Sc.E., Ph.D., sebagai Ketua Pengelola Program Studi S-2 Teknik Elektro, UGM.
3. Bapak Ir. Tumiran, M.Eng., Ph.D., sebagai Sekretaris Pengelola Program Studi S-2 Teknik Elektro, UGM.
4. Bapak Prof. Adhi Susanto, M.Sc., Ph.D., selaku pembimbing utama.
5. Bapak Ir. Hamzah Berahim, M.T., selaku pembimbing pendamping.
6. Semua dosen dan karyawan Program Studi S-2 Teknik Elektro, UGM.
7. Rekan-rekan mahasiswa S-2 Teknik Elektro Angkatan 1999 yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
8. *Engineering Education Development Project (EEDP)*, yang telah mensponsori studi penulis di Program Studi S-2 Teknik Elektro, UGM.
9. Khusus buat orangtua penulis, **M. Nababan & R. br. Silaban**, yang dengan kasihnya memberikan bantuan yang sangat berarti baik berupa moril maupun materiil selama penulisan tesis ini.
10. *Last, but not least, to my wife, Rawaty br. Purba*, atas segala pengorbanan dan pengertiannya selama penulisan tesis ini.

Akhir kata, semoga tesis ini bermanfaat bagi pengembangan pengetahuan, khususnya di bidang kelistrikan.

Yogyakarta, November 2001  
Penulis

# DAFTAR ISI

	Halaman
<b>Pernyataan</b> .....	0
<b>Prakata</b> .....	i
<b>Daftar isi</b> .....	ii
<b>Daftar Gambar</b> .....	v
<b>Daftar Tabel</b> .....	vii
<b>Lambang dan Singkatan</b> .....	ix
<b>Intisari</b> .....	xi
<b>Abstract</b> .....	xii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Perumusan masalah .....	3
1.3 Keaslian penelitian .....	3
1.4 Manfaat penelitian .....	6
1.5 Tujuan penelitian.....	7
1.6 Sistematika Penulisan.....	7
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	8
2.1 Telaah pustaka .....	8
2.2 Landasan teori.....	10
2.2.1 Definisi dasar dari harmonik .....	10
2.2.2 Deret dan analisis Fourier.....	12
2.2.3 Fungsi ortogonal.....	13
2.2.4 Sifat simetri bentuk gelombang.....	14
2.2.5 Transformasi Fourier.....	16
2.2.6 Transformasi Fourier diskret.....	17
2.3 Kuantitas listrik pada kondisi taksinusoidal.....	18
2.4 Indeks harmonik.....	20
2.4.1 <i>Total harmonic distortion</i> (THD) .....	19
2.4.2 <i>Total demand distortion</i> (TDD).....	20
2.4.3 Distorsi faktor daya .....	20
2.5 Titik sambung bersama ( <i>point of common coupling</i> (PCC)).....	22
2.6 Aliran daya harmonik dalam sistem tenaga.....	23
2.7 Pembatasan harmonik dalam sistem tenaga menurut Standar IEEE519-1992 .....	25
2.8 Penerapan batas harmonik pada fasilitas industri .....	26

2.9	Pemodelan sistem distribusi dan komponennya .....	28
2.9.1	Model transformator .....	29
2.9.2	Model saluran distribusi dan kabel.....	30
2.9.3	Model beban linear.....	31
2.9.4	Model beban taklinear.....	34
2.9.5	Model mesin berputar .....	34
2.10	Beban linear dan beban taklinear.....	36
2.11	Tapis paralel pasif (TPP).....	39
2.11.1	Maksud TPP.....	40
2.11.2	Tapis tertala tunggal ( <i>single tuned filter (STF)</i> ) .....	41
2.11.3	Tapis pelewat-tinggi ( <i>high pass filter (HPF)</i> ).....	43
2.11.4	Penyimpangan frekuensi tala ( <i>detuning</i> ) $\delta$ .....	46
2.11.5	Pengaruh impedans jaringan pada penapisan .....	47
2.11.6	Komponen TPP.....	50
2.12	Menentukan rating kapasitor untuk memperbaiki faktor daya suatu beban.....	51
2.13	Hipotesis .....	53
2.14	Rencana Penelitian .....	53
<b>BAB 3 CARA PENELITIAN .....</b>		<b>55</b>
3.1	Bahan dan alat penelitian .....	55
3.2	Pelaksanaan penelitian .....	55
3.2.1	Pengambilan data .....	55
3.2.2	Algoritma untuk analisis tegangan harmonik, arus harmonik dan THD <sub>v</sub> sebelum pemasangan TPP.....	58
3.2.3	Diagram alir untuk analisis tegangan harmonik, arus harmonik, dan THD <sub>v</sub> sebelum pemasangan TPP.....	60
3.2.5	Algoritma untuk analisis tegangan harmonik, arus harmonik dan THD <sub>v</sub> setelah pemasangan TPP.....	62
3.2.6	Menentukan letak TPP agar diperoleh pengurangan THD paling optimal.....	63
3.4	Analisis data .....	64
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>65</b>
4.1	Analisis tegangan harmonik, arus harmonik, dan THD <sub>v</sub> .....	65
4.2	Algoritma perhitungan kuantitas dalam per unit ekivalen .....	65
4.3	Desain tapis paralel pasif (TPP).....	70
4.3.1	TPP di rel-5 (Redesain Bank Kapasitor menjadi TPP).....	72
4.3.1.1	Elemen STF.....	73
4.3.1.2	Elemen HPF .....	73
4.3.1.3	Perhitungan perubahan faktor daya beban setelah TPP dipasang di rel - 5 .....	74
4.3.2	TPP di rel-9 (Rel tempat beban taklinear).....	77

4.3.2.1	Perhitungan perubahan faktor daya beban setelah TPP dipasang di rel - 9 .....	79
4.4	Penentuan letak TPP untuk mendapatkan pengurangan THDv paling optimum.....	80
4.5	Menggambarkan scan frekuensi harmonik vs impedans harmonik tanpa TPP, dan setelah 6000 kVAR BK diredesain di rel-5.....	81
4.5.1	Hasil scan frekuensi sebelum pemasangan TPP.....	82
4.5.2	Hasil scan frekuensi setelah redesain 6000 kVAR BK menjadi 6000 kVAR TPP di rel-5.....	83

<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	84
5.1 Kesimpulan .....	84
5.2 Saran .....	85

### **LISTING PROGRAM**

- A. Listing program sebelum pemasangan TPP
- B. Listing program setelah pemasangan TPP (6000 kVAR) di rel-5
- C. Listing program setelah pemasangan 900 kVAR TPP di rel-9 dan  
5100 kVAR BK di rel-5
- D. Listing program setelah pemasangan 900 kVAR TPP di rel-6 dan  
5100 kVAR BK di rel-6
- E. Listing program setelah pemasangan 900 kVAR TPP di rel-5 dan  
5100 kVAR BK di rel-5
- F. Listing program setelah pemasangan 900 kVAR TPP di rel-6 dan  
5100 kVAR BK di rel-5
- G. Listing program *scan* frekuensi harmonik vs impedans sistem  
sebelum pemasangan TPP
- H. Listing program *scan* frekuensi harmonik vs impedans sistem setelah  
6000 kVAR TPP dipasang di rel-5

### **HASIL EKSEKUSI PROGRAM**

- A. Tanpa TPP
- B. 6000 kVAR TPP di Rel-5
- C. 900 kVAR TPP di Rel-9 dan 5100 kVAR BK di Rel-5
- D. 900 kVAR TPP di Rel-6 dan 5100 kVAR BK di Rel-5
- E. 900 kVAR TPP di Rel-6 dan 5100 kVAR BK di Rel-6
- F. 900 kVAR TPP di Rel-5 dan 5100 kVAR BK di Rel-5

### **DAFTAR PUSTAKA**



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Gelombang total yang dibentuk oleh gelombang dasar dan akumulasi beberapa harmonik dari Tabel 2.2..... 17
Gambar 2.2(a)	PCC dipilih pada sisi tegangan tinggi transformator..... 22
Gambar 2.2(b)	PCC dipilih pada sisi tegangan rendah transformator..... 23
Gambar 2.3	Skema aliran daya dasar dan daya harmonik dalam suatu sistem a.c. (a) skema aliran daya dasar dan daya harmonik; (b) skema aliran daya dasar (c) skema aliran daya harmonik ..... 24
Gambar 2.4	Diagram segaris suatu sistem distribusi..... 29
Gambar 2.5	Model transformator untuk analisis harmonik..... 30
Gambar 2.6	Model beban untuk analisis harmonik..... 31
Gambar 2.7	Representasi generator sinkron..... 34
Gambar 2.8	Representasi motor induksi..... 35
Gambar 2.9	(a) Untai TPP <i>single-tuned</i> (b) Impedans terhadap frekuensi..... 42
Gambar 2.10	HPF: (a) orde pertama; (b) orde kedua; (c) orde ketiga (d) tipe-C..... 43
Gambar 2.11	(a) TPP high-pass filter orde kedua; (b) Impedans terhadap frekuensi ..... 44
Gambar 2.12	Prinsip aliran arus harmonik pada suatu sistem..... 48
Gambar 2.13	Segitiga Daya..... 52
Gambar 3.1	Diagram segaris kasus uji sistem IEEE: Sistem Distribusi Setimbang 13-rel suatu Industri ..... 56

Gambar 3.2	Untaian untuk perhitungan tegangan harmonik, arus harmonik, dan THDv sebelum pemasangan TPP.....	60
Gambar 3.3	Diagram alir untuk analisis tegangan harmonik, arus harmonik dan THDv.....	61
Gambar 3.4	Untaian untuk perhitungan tegangan harmonik, arus harmonik, dan THDv setelah pemasangan TPP .....	62
Gambar 4.1	Diagram pendekatan impedans harmonik untuk Trafo 1 menurut model pada Sub-bab 2.9.1.....	69
Gambar 4.2	Diagram impedans harmonik sistem dalam pu ( $h$ adalah indeks harmonik) dari Gambar 3.1.....	71
Gambar 4.3	Diagram segaris TPP (STF dan HPF-orde dua) per fase.....	73
Gambar 4.4	Untai STF-5 <sup>th</sup> per fase di rel-5.....	74
Gambar 4.5	Untai HPF per fase di rel-5.....	75
Gambar 4.6	<i>Scan</i> frekuensi harmonik vs impedans harmonik sistem pada rel-9 dan 10 tanpa TPP.....	82
Gambar 4.7	<i>Scan</i> frekuensi harmonik vs impedans harmonik sistem pada rel-9 dan 10 setelah redesain 6000 kVAR BK menjadi 6000 kVAR TPP di rel-5.....	83

## DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 2.1	Kategori dan karakteristik khas pada fenomena elektromagnetik sistem daya.....	11
Tabel 2.2	Arus harmonik yang disebabkan oleh penyearah enam pulsa..	16
Tabel 2.3	Batas Distorsi Arus (dalam % $I_L$ ) untuk Sistem Distribusi Umum (120-69.000V) .....	25
Tabel 2.4	Batas Distorsi Arus (dalam % $I_L$ ) untuk Sistem Subtransmisi Umum (69.001-161.000V).....	26
Tabel 2.5	Batas Distorsi Arus (dalam % $I_L$ ) untuk Sistem Transmisi Umum (>161.000V).....	26
Table 2.6	Batas Distorsi Tegangan (dalam % $V_1$ ) .....	26
Tabel 2.7	Komposisi beban pada sistem tenaga listrik .....	37
Tabel 2.8	Karakteristik harmonik yang dibangkitkan oleh berbagai tipe beban taklinear.....	38
Tabel 3.1	Data Saluran dan Kabel dalam Per-Unit (Base: 13.8 kV; 10 MVA) .....	56
Tabel 3.2	Data Transformator gambar 3.1 .....	57
Tabel 3.3	Data Pembangkitan, Beban, dan Tegangan Bus gambar 3.1...	57
Tabel 3.4	Data Pembangkitan Arus Harmonik oleh ASD .....	57
Tabel 3.5	Hasil pengukuran tegangan harmonik (tegangan kawat-netral ( $V_{LN}$ )) .....	58
Tabel 4.1	Nilai basis sistem (Basis daya 10000 kVA).....	66
Tabel.4.2	Data pembangkitan arus harmonik oleh ASD pada Gambar 3.1.....	67

Tabel 4.3	Impedans transformator pada Gambar 3.1 dalam pu.....	68
Tabel 4.4	4 Impedans harmonik beban sistem pada Gambar 3.1.....	70
Tabel 4.5	Spesifikasi per fase komponen 6000 kVAR TPP di rel-5.....	76
Tabel 4.6	Perbandingan perbaikan faktor daya oleh Bank kapasitor dan TPP.....	78
Tabel 4.7	Spesifikasi per fase komponen 900 kVAR TPP di rel-9.....	80
Tabel 4.8	Perbandingan perbaikan faktor daya beban taklinear (ASD) sebelum dan setelah pemasangan TPP di rel-9.....	80
Tabel 4.9	Perbandingan THDv tiap rel pada enam jenis perlakuan.....	81

## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

IEEE	<i>Institute of Electrical &amp; Electronic Engineers</i>
ASD	<i>adjustable speed drives</i>
PCC	<i>point of common coupling</i>
TPP	tapis paralel pasif ( <i>passive shunt filter</i> )
UPS	<i>uninterruptible power systems</i>
P	daya aktif
pu	per unit
Q	daya reaktif ; faktor kualitas TPP
PB	bidang lewat ( <i>pass band</i> )
$\delta$	deviasi frekuensi tala
$X_0$	induktans induktor atau kapasitans kapasitor (komponen TPP)
S	daya nyata
$I_L$	permintaan arus beban maksimum
P	total permintaan MW
K	<i>motor fraction of the total MW</i>
KE	<i>electronic controlled load fraction of total MW</i>
$K_1$	<i>severity of starting condition</i>
$\omega$	kecepatan sudut (radian)
$\Delta f$	perubahan frekuensi (Hz)
$\Delta L$	perubahan induktans (H)
$\Delta C$	perubahan kapasitans (F)
$L_h$	induktans harmonik ke- $h$
$C_h$	kapasitans harmonik ke- $h$
$\omega_0 = 2\pi / T$	kecepatan sudut (radian/detik)

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

*voltage total harmonic distortion*

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100$$

*current total harmonic distortion*

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L}$$

*Total Demand Distortion*

$h$

orde harmonik

$(R_s + jX_s)$

Impedans jaringan

$V_{rms}$

tegangan efektif

$I_{rms}$

arus efektif

$$pf_{tot} = \frac{P}{S}$$

faktor daya

$$S_{Dw} = \sum_i (S_{Di} \times W_i)$$

*weighted disturbing power*

$S_{Di}$

rating daya beban taklinear (kVA)

$W_i$

*weighting factor* beban taklinear (pu)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

frekuensi resonans

$$Q = \frac{X_o}{R}$$

faktor kualitas STF

$$Y_f \cong \frac{1}{R(1 + j2Q\delta)}$$

admitans TPP

$$G_f = \frac{Q}{X_o(1 + 4Q^2\delta^2)}$$

konduktans

$$B_f = \frac{2\delta Q^2}{X_o(1 + 4Q^2\delta^2)}$$

suseptans kapasitif

## Intisari

Distorsi bentuk gelombang sinusoidal tegangan dan arus oleh harmonik, yang disebabkan beban taklinear, merupakan satu masalah utama kualitas daya dalam industri daya listrik. Banyak kerugian yang ditimbulkan oleh distorsi harmonik. Oleh karena itu, peraturan Standar IEEE 519-1992 untuk pengendalian harmonik dalam sistem daya listrik telah diterbitkan.

Penelitian ini bertujuan untuk: menghitung tegangan dan arus harmonik serta THD<sub>v</sub> pada setiap rel; mendesain TPP untuk mengurangi THD<sub>v</sub>; menghitung perubahan faktor daya beban bila bank kapasitor (BK) didesain-ulang menjadi TPP; optimisasi letak TPP ditinjau atas pengurangan THD<sub>v</sub>; serta menggambarkan *scan* frekuensi terhadap impedans sistem, dalam satu model 13-rel sistem distribusi tenaga listrik setimbang suatu industri yang menggunakan beban taklinear.

Hasil pengurangan THD<sub>v</sub> paling optimum diperoleh apabila 6000 kVAR Bank Kapasitor diredesain menjadi 6000 kVAR TPP di rel-5, yaitu dari 2,9339% menjadi 1,2173% pada rel-9, dan dari 2,9560% menjadi 1,1622% pada rel-10. Rerata penurunan faktor daya beban, setelah 6000 kVAR diredesain menjadi 6000 kVAR TPP, adalah 0,83%.

Hasil analisis *scan* frekuensi harmonik terhadap impedans sistem, sebelum pemasangan TPP, memperlihatkan terjadinya resonans paralel dan seri. Namun, kedua jenis resonans ini tidak terjadi lagi setelah pemasangan TPP.

**Kata-kata kunci:** Pemodelan, distorsi harmonik, dan tapis paralel pasif.

## Abstract

The harmonic distortion of sinusoidal waveform of voltage and current, caused by nonlinear loads, is one prominent problem of power quality in the electric power industry. Many problems may result from harmonic distortion. Therefore, IEEE Standard 519-1992 for harmonic control in electric power systems has been published.

This research aims to: seeking harmonic voltage and current as well as THD<sub>v</sub> at each bus; designing TPP to reduce THD<sub>v</sub>; seeking displacement of load power factor if a capacitor bank redesigned as TPP; optimizing location of the TPP to reduce THD<sub>v</sub>; plotting frequency scan versus system's impedances, in a 13-bus balanced industrial distribution system model that employ nonlinear load.

Reduction of THD<sub>v</sub> if 6000 kVAR capacitor bank redesigned as 6000 kVAR TPP at bus-5, that is from 2.9339% become 1.2173% at bus-9, and from 2.9560% become 1.1622% at bus-10. Mean of decrease of the load power factor is 0.83%.

Results of frequency analysis of harmonic frequencies based on system impedans, before employing the TPP, showed parallel and series resonances, and both resonances dissappeared when the TPP was in place.

**Keywords:** Modeling, harmonic distortion, and passive shunt filter.