

Kajian terhadap Upaya Penghematan Energi pada Aplikasi Motor Kapasitor

Rini Nur Hasanah

Abstrak—Makalah ini membahas suatu contoh upaya penghematan energi pada aplikasi motor kapasitor. Dengan mengambil inspirasi dari salah satu karya paten Frank Nola dari NASA, suatu peralatan semikonduktor yaitu TRIAC dipilih sebagai konverter daya dalam implementasi algoritma penghematan energi. Suatu rangkaian elektronika sederhana dirancang dan dibuat untuk memicu bekerjanya TRIAC. Agar secara instruksional lebih bermanfaat, disertakan pula contoh hasil pemilihan nilai komponen-komponen elektronika yang digunakan. Hasil percobaan di laboratorium menunjukkan bahwa penggunaan TRIAC untuk mengurangi konsumsi energi listrik terbukti menguntungkan jika digunakan pada aplikasi motor kapasitor yang pada sebagian besar rentang waktu operasinya berbeban rendah, misalnya pada aplikasi pompa. Hal ini dimungkinkan karena pengurangan tegangan efektif masukan ke motor akan menyebabkan pengurangan daya masukan, disertai dengan perbaikan faktor daya dan efisiensi motor.

Kata Kunci—hemat energi, motor kapasitor, TRIAC

I. PENDAHULUAN

TERUS berlangsungnya krisis energi dunia membawa dampak dalam berbagai bidang. Banyak upaya telah, sedang, dan akan terus dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini, dengan prioritas untuk lebih meningkatkan terjaminnya pasokan energi maupun sumbernya. Para ahli dari berbagai cabang ilmu berusaha melakukan riset untuk mencari lebih banyak sumber-sumber energi baru, upaya-upaya penghematan energi, maupun untuk menggunakan energi secara lebih bijak. Penggunaan energi yang bijak tidak hanya menjadi landasan kuat langkah konservasi energi, melainkan juga dapat menjanjikan keuntungan finansial yang menarik.

Di negara-negara maju konsumsi energi listrik didominasi oleh penggunaan motor listrik. Peralatan ini banyak dijumpai di berbagai sektor kegiatan seperti industri, perdagangan, transportasi, komunikasi, fasilitas-fasilitas publik maupun dalam rumah tangga. Motor listrik mengonsumsi lebih dari separuh energi listrik yang dibangkitkan pusat-pusat pembangkit listrik, hampir tiga perempat konsumsi listrik industri, serta hampir separuh dari konsumsi listrik di sektor perdagangan. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa

motor listrik merupakan tipe beban yang paling mendominasi konsumsi energi listrik sehingga menjadi salah satu target utama dalam upaya penghematan energi. Karena motor-motor listrik merupakan penyerap energi terbesar, perbaikan efisiensi meskipun kecil yang dilakukan pada motor secara keseluruhan akan menghasilkan penghematan energi yang cukup signifikan.

Mengingat kesederhanaan dan konstruksinya yang kokoh, motor induksi khususnya yang berotor sangkar merupakan jenis motor listrik yang paling banyak digunakan. Motor induksi mengonsumsi sekitar 90-95% dari total total konsumsi energi oleh motor listrik, yang setara dengan kira-kira 53% total konsumsi energi listrik [1]. Motor induksi banyak digunakan sebagai penggerak dalam dunia industri, perdagangan, pelayanan publik, traksi and peralatan-peralatan rumah tangga.

Secara umum sudah diketahui bahwa sebagian besar motor induksi yang berbeban rendah bekerja jauh di bawah rentang operasi efisiennya. Efisiensi motor induksi menurun drastis jika dioperasikan dengan beban kurang dari 40% nilai nominalnya [1]. Hal ini memperkuat pentingnya upaya penghematan energi dalam dunia aplikasi motor listrik.

Distribusi persentase banyaknya motor berdasarkan level pembebanan dan jenis aplikasinya ditunjukkan pada Tabel I, sedangkan distribusinya berdasarkan kategori kapasitasnya dalam satuan *horsepower* ditunjukkan pada Tabel II [2]. Tabel-tabel tersebut menunjukkan bahwa distribusi banyaknya motor berdasarkan level pembebanan tidak berbanding secara proporsional terhadap ukuran/kapasitas motor. Terlihat pula bahwa proporsi banyaknya motor yang berbeban rendah (kurang dari 40% beban nominalnya) cukup bervariasi untuk berbagai jenis aplikasi, sehingga layak untuk diberi perhatian. Dalam keadaan berbeban rendah, sistem penggerak secara keseluruhan akan beroperasi jauh di bawah titik kerja terbaiknya [3].

Upaya penghematan energi secara menyeluruh dalam suatu sistem yang menggunakan penggerak motor listrik harus mempertimbangkan upaya penghematan pada setiap komponen-komponen penting berikut:

- Daya masukan ke sistem, misalnya dengan cara meningkatkan kualitas catu dayanya
- Pengendalian motor, misalnya dengan memperbaiki pengendalian kecepatan motor
- Motor listrik, dengan pemilihan kapasitas motor yang tepat atau dengan penggunaan motor dengan

R.-N. Hasanah adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia. (Tel. 0341-554166; email rini.hasanah@ub.ac.id)

efisiensi yang lebih baik

- Sistem pengopelan antar komponen, misalnya dengan menggunakan transmisi mekanik yang lebih baik atau meningkatkan upaya perawatan
- Beban, dengan menerapkan manajemen atau penggiliran beban, meningkatkan efisiensi peralatan-peralatan yang langsung berkaitan dengan pengguna (misalnya kipas angin, pompa, kompressor, dan lain-lain)
- Proses, misalnya dengan penerapan teknik-teknik optimasi proses.

Dengan melihat peran penting motor induksi, dalam makalah ini diuraikan salah satu upaya penghematan energi yang dapat dilakukan, terutama dalam aplikasi motor-motor berdaya rendah, khususnya aplikasi motor

TABEL I
DISTRIBUSI PERSENTASE BANYAKNYA MOTOR
BERDASARKAN LEVEL PEMBEBANAN DAN JENIS APLIKASI

Level Pembebanan (% Beban Penuh)	Jenis Aplikasi				
	Melibatkan pengolahan fluida			Lain-lain	Keseluruhan
	Kompresor udara	Kipas angin	Pompa		
<40%	15%	30%	39%	55%	44%
40-120%	84%	69%	56%	43%	53%
>120%	1%	1%	4%	2%	2%

TABEL II
DISTRIBUSI PERSENTASE BANYAKNYA MOTOR
BERDASARKAN LEVEL PEMBEBANAN DAN KAPASITAS MOTOR

Level Pembebanan (% Beban Penuh)	Kategori [dalam HP]					
	1-3	6-20	21-50	51-100	101-200	200+
<40%	42%	48%	39%	45%	24%	40%
40-120%	54%	51%	60%	54%	75%	58%
>120%	4%	1%	1%	0%	1%	2%

kapasitor (Gambar 1).



Gambar 1. Motor dua-fasa menggunakan kapasitor untuk aplikasi pompa sirkulasi fluida

Suatu sumbangan pemikiran dalam makalah ini diupayakan dengan mempertimbangkan potensi penghematan energi ketika motor bekerja. Penghematan energi dalam aplikasi motor dapat dibuat dengan selalu mengupayakan penggunaan energi hanya sebatas yang dibutuhkan ketika bekerja [4-7]. Dalam makalah ini, penghematan ini dicapai melalui pengurangan masukan energi listrik ke motor dengan memanfaatkan

penggunaan komponen semikonduktor TRIAC.

II. METODE

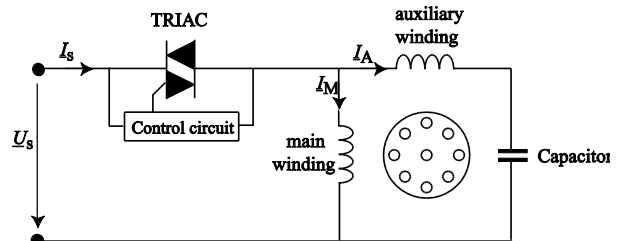
Dengan mengambil inspirasi dari salah satu paten temuan Nola dari NASA, Paten Nola US4052648, sebuah TRIAC dipilih sebagai konverter daya yang digunakan dalam implementasi algoritma penghematan energi. Metode yang digunakan berupa pengurangan tegangan masukan yang diberikan ke motor ketika motor bekerja dengan beban kurang dari beban nominalnya. Penggunaan TRIAC memungkinkan hal ini dapat dilakukan karena saat pemicuannya untuk bekerja dapat diatur dengan mengatur sudut penyalanya, yang selanjutnya akan mempengaruhi nilai tegangan efektif yang diberikan ke motor.

Suatu rangkaian elektronik untuk memicu bekerjanya motor kapasitor kemudian dirancang dan dibuat. Agar memberikan manfaat secara instruksional/akademik, contoh hasil pemilihan nilai komponen-komponen yang digunakan juga disertakan. Pengujian di laboratorium dilakukan untuk membuktikan potensi penghematan energi yang diperoleh serta untuk menegaskan bahwa pengurangan konsumsi energi dimungkinkan jika selama sebagian besar waktu operasinya kapasitor motor bekerja dengan beban kurang dari nominalnya, yang merupakan kasus yang paling banyak dijumpai dalam aplikasinya.

III. RANCANG BANGUN SISTEM

A. Rancangan Sistem

Dalam rancangan ini, TRIAC digunakan untuk mengurangi daya masukan ke motor dan ditempatkan di antara motor dan catu daya masukan (Gambar 2).



Gambar 2. Skema penempatan TRIAC dalam rangkaian motor kapasitor yang digunakan

Spesifikasi motor kapasitor (M672LEME) yang digunakan ditunjukkan pada Tabel III, sedangkan parameter-parameter terkait serta sudut penyalan yang dibutuhkan untuk berbagai kondisi pembebanan berturut-turut ditunjukkan pada Tabel IV dan V.

B. Rangkaian Pengendali

Rangkaian pengendali digunakan untuk memicu TRIAC bekerja, dan terbuat dari suatu rangkaian elektronik yang digunakan untuk membangkitkan sebuah pulsa tunggal pada setiap setengah gelombang tegangan masukan. Bagian-bagian penyusun rangkaian pengendali ini berturut-turut diperlihatkan pada Gambar 3 hingga Gambar 6.

TABEL III
SPESIFIKASI MOTOR KAPASITOR M672LEME
YANG DIGUNAKAN UNTUK PERCOBAAN

Daya nominal [W]	750
Kecepatan nominal [rpm]	1425
Jumlah kutub	4
Frekuensi nominal [Hz]	50
Tegangan nominal [V]	220
Arus nominal [A]	5,30
Kapasitans kapasitor [F]	20
Faktor daya	0,91
Efisiensi [%]	71,0
Torsi mula relatif	0,2
Arus mula relatif	3,8
Berat motor [kg]	14,5
Inersia motor [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0,003

TABEL IV
PARAMETER MOTOR KAPASITOR M672LEME YANG
DIGUNAKAN UNTUK PERCOBAAN

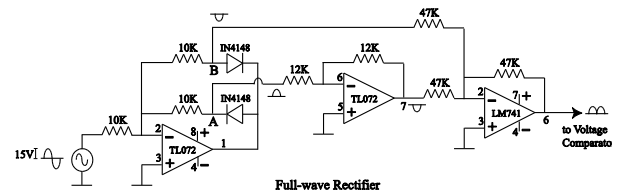
Parameter	Nilai dalam ohm
Resistans belitan utama R_M	4,87
Reaktans bocor belitan utama x_{iM}	3,974
Reaktans pemagnetan dilihat dari belitan utama X_{mm}	71,132
Resistans belitan bantu R_A	17,264
Reaktans bocor belitan bantu x_{iA}	23,273
Reaktans pemagnetan dilihat dari belitan bantu X_{ma}	125,825
Perbandingan belitan $a=N_a/N_m$	1,33
Resistans rotor dilihat dari belitan utama R_{rm}	3,454
Reaktans bocor rotor dilihat dari belitan utama x_{irm}	3,974
Resistans rotor dilihat dari belitan bantu R_{ra}	6,11
Reaktans bocor rotor dilihat dari belitan bantu x_{ira}	7,03

TABEL V
SUDUT TUNDA UNTUK BERBAGAI KONDISI PEMBEBANAN
MOTOR KAPASITOR M672LEME

Torsi beban yang diinginkan	Tegangan yang diperlukan	Sudut picu yang diperlukan	Sudut pemadaman yang dihasilkan
[p.u.]	[p.u.]	[degree]	[degree]
1	1	37,16	217,16
0,9	0,948	54,5	216,5
0,8	0,894	66,25	216,25
0,7	0,836	75,75	214,75
0,6	0,775	85	215
0,5	0,707	93,75	213,75
0,4	0,632	102,5	212,5
0,3	0,547	112	211
0,2	0,447	122,5	208,5
0,1	0,316	136,5	205,5

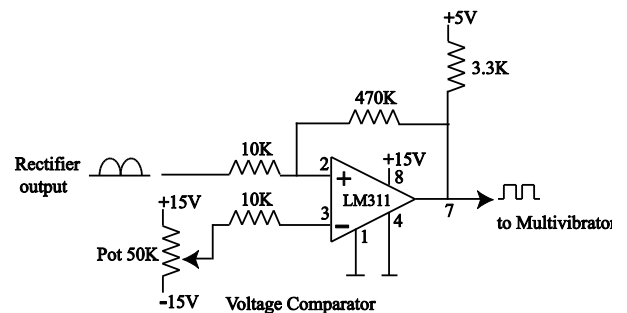
Dalam setiap setengah perjalanan gelombang tegangannya, *TRIAC* dipicu menggunakan pulsa tunggal yang dihasilkan oleh sebuah *dual multi-vibrator*. *Multi-vibrator* ini menghasilkan dua buah pulsa, yang satu mempunyai lebar tetap, sedangkan yang lainnya mempunyai lebar pulsa yang dapat diubah-ubah. Pulsa dengan lebar tetap digunakan untuk menginjeksikan pulsa pemicu ke *TRIAC*, sedangkan pulsa dengan lebar variabel digunakan untuk mengubah-ubah lama waktu

tunda pemecuan dihitung dari saat gelombang tegangan melintasi titik nolnya.



Gambar 3. Penyearah gelombang penuh yang menghasilkan sinyal masukan ke pembanding tegangan

Multi-vibrator mempunyai sinyal masukan yang berbentuk segiempat yang dihasilkan dengan menggunakan pembanding tegangan dari sinyal sinusoidal yang telah disearahkan. Sinyal tegangan sinusoidal yang menjadi masukan bagi penyearah diperoleh dari jala-jala setelah sebelumnya diturunkan terlebih dulu menggunakan trafo *step-down*. Agar dapat diperoleh tegangan searah yang akan digunakan untuk mencatu rangkaian pengendali *TRIAC*, keluaran trafo disearahkan dengan menggunakan penyearah gelombang penuh. Hal ini memungkinkan rangkaian pengendali *TRIAC* bekerja dengan level tegangan yang jauh di bawah level tegangan motor.



Gambar 4. Pembanding tegangan yang menghasilkan sinyal masukan bagi *multi-vibrator*

Beberapa nilai resistansi yang dipasangkan secara seri dengan potensiometer 100k Ω untuk mengubah-ubah sudut penyalan *TRIAC* diperlihatkan pada Tabel VI. Nilai resistansi beserta lama waktu dan sudut tunda terkecil dan terbesar yang terkait juga ditampilkan.

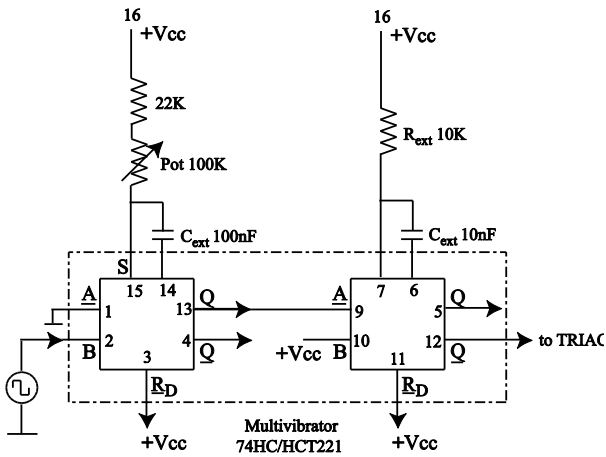
TABEL VI
NILAI RESISTANS EKSTERNAL DAN SUDUT TUNDA MINIMUM DAN
MAKSIMUM YANG BERSEBUAIAN

R_{ext} [ohm]	Penundaan terkecil [ms]	Penundaan terkecil [deg]	Penundaan terbesar [ms]	Penundaan terbesar [deg]
5,6K	0,2	3,6	4,6	82,8
10K	0,4	7,2	4,8	86,4
22K	1,0	18	5,2	93,6
33K	1,4	25,2	5,6	100,8
47K	2,0	3,6	6,4	115,2
56K	0,2	3,6	4,4	79,2

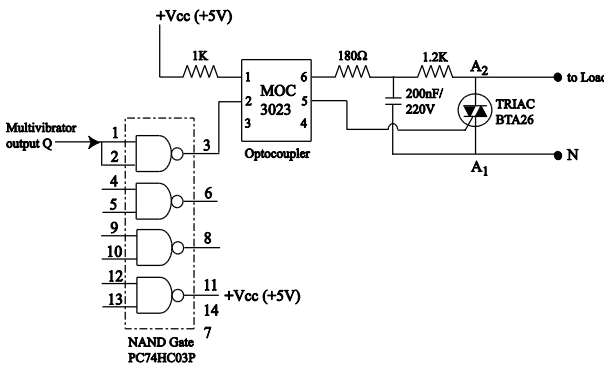
Agar rentang jangkauan perubahan sudut penyalan yang diinginkan masih dapat tercakup, sebuah resistor seri sebesar 22k Ω dipasangkan secara seri dengan rangkaian pemicu *TRIAC* yang digunakan dalam pengujian di laboratorium. Ketika menghitung sudut tunda yang sebenarnya, harus diperhitungkan juga lebar

pulsa penunda serta perubahan nilai tegangan acuan pada pembanding tegangan yang digunakan.

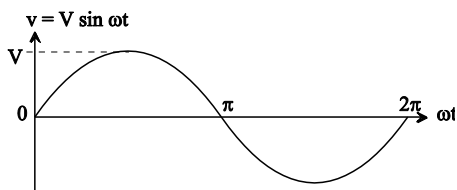
Perubahan bentuk gelombang sinyal yang digunakan untuk menghasilkan pulsa pemicu TRIAC secara berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 7 hingga Gambar 11.



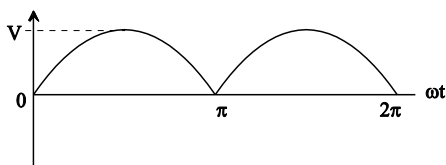
Gambar 5. Rangkaian multi-vibrator yang menghasilkan sinyal masukan ke TRIAC



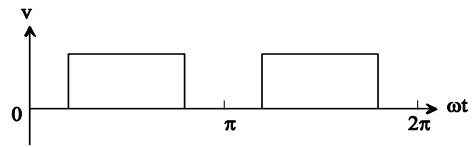
Gambar 6. Keluaran multi-vibrator untuk memicu TRIAC



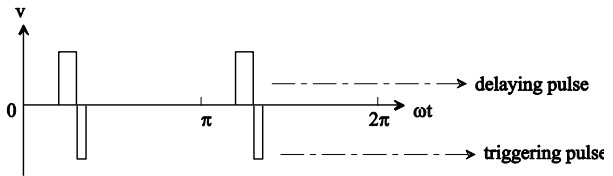
Gambar 7. Bentuk gelombang tegangan keluaran trafo step-down



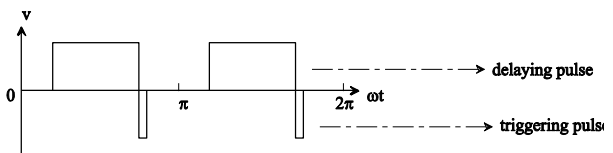
Gambar 8. Bentuk gelombang tegangan keluaran penyearah gelombang penuh



Gambar 9. Bentuk gelombang tegangan keluaran komparator



Gambar 10. Bentuk gelombang tegangan keluaran dual-multivibrator pada kondisi penundaan minimum



Gambar 11. Bentuk gelombang tegangan keluaran dual-multivibrator pada kondisi penundaan minimum

IV. HASIL DAN DISKUSI

Prototipe sistem TRIACS yang digunakan pada motor kapasitor yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 12, sedangkan pengurangan daya masukan yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel VII. Dengan mempertahankan kecepatan kerja, dicoba beberapa kondisi pembebanan yang berbeda.

TABEL VII
HASIL PERCOBAAN PEMBEBANAN MOTOR KAPASITOR YANG DILENGKAPI DENGAN TRIACS

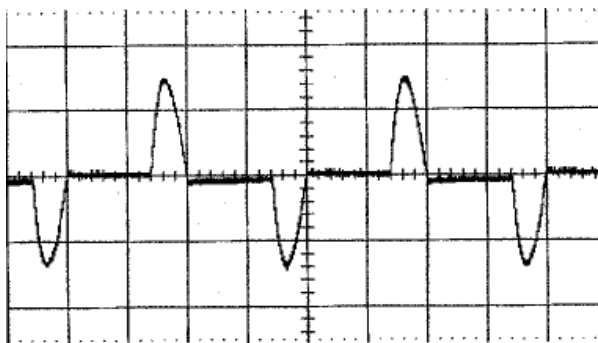
Besaran	Unit	126	117	99	72	18
Sudut penyalakan	[deg]					
V_{in}	[V]	98,5	139,8	168	193,6	217,8
I_{in}	[A]	2,77	3,72	4,34	4,72	5,08
P_{in}	[W]	212	425	624	812	996
pf	[-]	0,777	0,820	0,855	0,887	0,899
T_L	[Nm]	1,0054	2,043	3,002	4,049	5,029
n	[rpm]	1441	1441,6	1440,6	1441,6	1441,3
P_{out}	[W]	144	300	445	603	751
η	[%]	67,79	70,69	71,29	74,29	75,41

Secara umum pengurangan daya masukan pada motor induksi dimungkinkan untuk dilakukan tanpa mengorbankan fungsi utama motor, dalam hal ini direpresentasikan dengan kerja motor pada kecepatan konstan, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel VII. Penggunaan TRIACS untuk mengurangi tegangan masukan pada aplikasi motor kapasitor akan menguntungkan, khususnya pada motor-motor yang bekerja dengan beban rendah. Kondisi faktor daya yang lebih baik juga dihasilkan, yang berarti diperolehnya rugi-rugi yang lebih kecil. Hal ini merupakan keadaan yang diinginkan baik dipandang dari sisi produsen maupun konsumen energi listrik. Efisiensi yang lebih baik juga diperoleh, meskipun tidak sebaik yang diperoleh dengan menggunakan pengatur tegangan

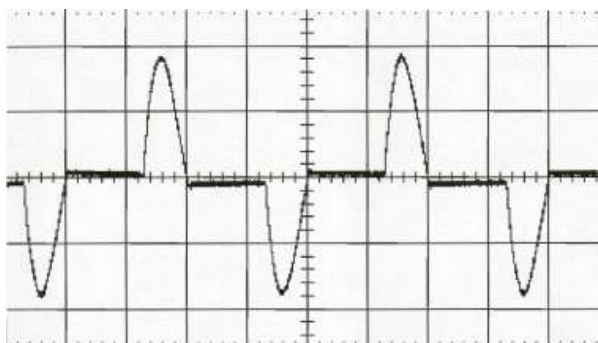
masukannya. Hal ini dikarenakan oleh harmonisa akibat penggunaan *TRIACS*.



Gambar 12. Sebuah motor kapasitor yang dilengkapi dengan prototipe sistem *TRIACS* sebagai pengatur tegangan masukan



Gambar 13. Bentuk gelombang arus tunak masukan motor kapasitor berbeban 20% nominal yang dilengkapi dengan *TRIACS*

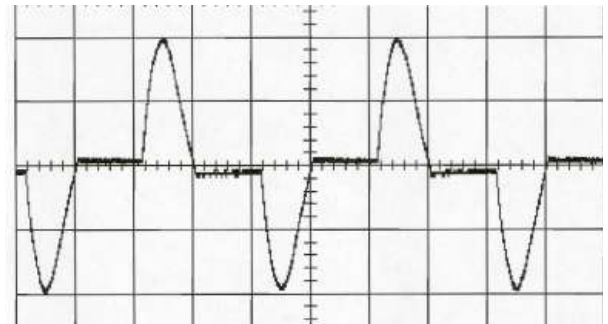


Gambar 14. Bentuk gelombang arus tunak masukan motor kapasitor berbeban 40% nominal yang dilengkapi dengan *TRIACS*

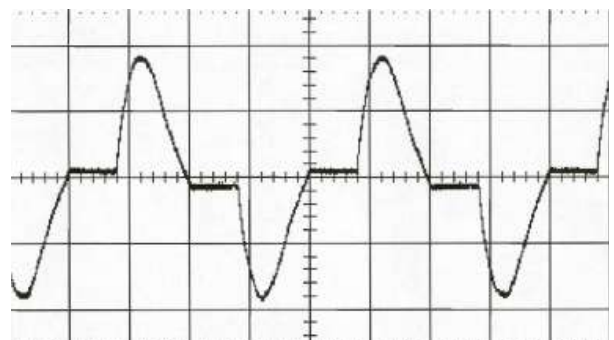
Bentuk gelombang arus tunak masukan motor kapasitor pada berbagai kondisi pembebanan dapat dilihat pada Gambar 13-17. Sudut penyalan *TRIACS* yang digunakan pada tiap kondisi pembebanan dapat diamati dari setiap gambar, atau dapat dibaca dari Tabel 7.

Gambar 17 menunjukkan bahwa pada beban nominal bentuk gelombang arus masukan yang diperoleh tidak berupa sinusoidal murni sebagaimana yang diharapkan. Hal ini disebabkan oleh nilai minimum resistans yang mungkin dari resistor yang dipasangkan secara seri dengan potensiometer pada multivibrator yang digunakan untuk mengatur sudut penyalan *TRIACS*.

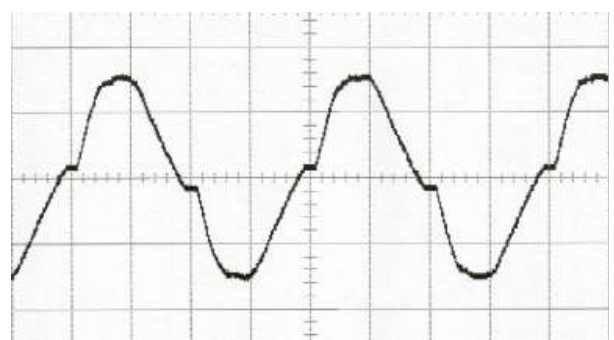
Sebagai akibat dari pemilihan dan ketersediaan nilai-nilai komponen yang digunakan, selain harus disadari bahwa penggunaan *TRIACS* tidak untuk motor dengan kondisi beban nominal, maka sudut minimum penyalan *TRIACS* sengaja dibuat lebih besar dari pada sudut bebannya.



Gambar 15. Bentuk gelombang arus tunak masukan motor kapasitor berbeban 60% nominal yang dilengkapi dengan *TRIACS*



Gambar 16. Bentuk gelombang arus tunak masukan motor kapasitor berbeban 80% nominal yang dilengkapi dengan *TRIACS*



Gambar 17. Bentuk gelombang arus tunak masukan motor kapasitor berbeban nominal yang dilengkapi dengan *TRIACS*

V. KESIMPULAN DAN PROSPEK

Percobaan yang telah dilakukan pada motor kapasitor dapat memberikan cukup pemahaman mengenai bagaimana *TRIACS* bekerja dan dapat dimanfaatkan untuk menghemat energi pada aplikasi motor induksi. Kontribusi saran terhadap upaya perbaikan penghematan energi pada aplikasi motor-motor berdaya rendah dapat dilakukan dengan cara menyesuaikan besarnya arus energi yang diberikan ke motor mengikuti

kondisi beban, yang selanjutnya membuka banyak kemungkinan penggunaan berbagai variasi algoritma pengendalian.

Disimpulkan bahwa penggunaan *TRIACS* untuk mengurangi konsumsi energi listrik dapat diterima jika motor-motor induksi pada sebagian besar waktu operasinya bekerja dengan beban rendah. Hal ini dimungkinkan dengan pengurangan tegangan efektif masukannya, yang selanjutnya akan mengurangi daya masukan, dan juga dapat menghasilkan perbaikan faktor daya dan efisiensi motor.

Meskipun penghematan energi yang diperoleh pada suatu motor berdaya rendah secara individual relatif kecil, namun mengingat banyaknya penggunaan jenis motor ini, potensi penghematan yang dapat diperoleh secara global akan menjadi sangat berarti. Banyak dari jenis motor ini yang secara terus-menerus digunakan dengan beban rendah, mislanya pada aplikasi motor untuk pompa sirkulasi fluida pemanas, peralatan-peralatan rumah tangga seperti kipas angin, kompresor mesin pendingin, sistem penyesuai suhu pada industri, dan sebagainya.

Untuk memperluas jangkauan aplikasinya, penggunaan *TRIACS* dapat dibarengi dengan pengendalian secara elektronik untuk menerapkan algoritma yang sesuai untuk penghematan energi pada kondisi beban rendah. Untuk ini harus dipenuhi bebarapa syarat antara lain:

- harga murah, produksi banyak
- solusi dengan penolakan harmonisa berorde sangat rendah

- kepedulian akan pentingnya upaya penghematan energi yang dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Marcel Jufer, Direktur Laboratorium Elektromekanik dan Mesin Elektrik (LEME) Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, beserta seluruh staf dan karyawan yang telah memungkinkan diperolehnya data yang digunakan dalam artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. de Almeida, P. Bertoldi, W. Leonhard. *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*, Springer-Verlag Berlin, 1997, ISBN 3-540-63068-6.
- [2] U.S. DOE's Office of Industrial Technology. *Motor Challenge*, 1998. Available: <http://www.oit.doe.gov/bestpractices/motors/> [Online]
- [3] *Product and Technology Review*, PTR #17, August 2007, page 2. Available: <http://www.energyideas.org/documents/factsheets/PTR/MotorVoltageControllers.pdf>
- [4] E.D. Basset, F.M. Potter. "Capacitive for Induction Generators", *Electrical Engineering (AIEE Trans.)*, vol. 54, May 1935, pp. 540-545.
- [5] A. Abbondanti, M.B. Brennen. "Variable Speed Induction Motor Drives Use Electronic Slip Calculator Based on Motor Voltages and Currents", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-11, No. 5, Sept/Oct 1975, pp. 483-488.
- [6] A. Abbondanti. "Method of Flux Control in Induction Motors Driven by Variable Frequency, Variable Voltage Supplies", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-11, No. 5, Sept/Oct 1975, pp. 177-184.
- [7] P. Vas. *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Oxford University Press, Oxford, 1993, ISBN 0-19-859375-9.