

Design of Power Factor Corection (PFC) with Metering and Capacitor Bank Control for Dynamic Load

Yahya Chusna Arif¹, Indhana Sudiharto², Farit Ardiansyah³

¹ Dosen Jurusan Teknik Elektro Industri

² Dosen Jurusan Teknik Elektro Industri

³ Mahasiswa D4 Jurusan Teknik Elektro Industri

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – ITS

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Email: rraci2@gmail.com

Abstract

A good power quality will improve the voltage drop, power factor, power loss, power capacity and electric energy efficiency. Good power quality is when the power factor > 0.85 (Cos θ > 0.85) and it can increase the efficiency of electric power. To improve the power factor (Cos θ) on the power system with inductive load, that needed a reactive power compensator with a microcontroller as a automatic soft switch controllers to eliminate the inrush current that is very large, can reach 150 to 250 times the nominal current.

Keywords: power quality, Power factor, soft switches controller, inrush current, microcontroller.

I. PENDAHULUAN

Tugas Akhir rancang bangun PFC yang dilengkapi metering dengan pengontrolan kapasitor bank untuk beban dinamis adalah memperbaiki power faktor (Cos θ) pada sistem tenaga listrik. Dengan banyaknya beban induktif yang digunakan, maka diperlukan suatu kompensator daya reaktif berupa kapasitor bank. Mikrokontroler digunakan sebagai controller soft switch otomatis. Controller soft switch otomatis berfungsi untuk mengatur penggunaan kapasitor agar power faktor sesuai dengan set poin.

Kompensator daya reaktif konvensional pada umumnya terdiri dari kapasitor bank yang dihubungkan paralel dengan beban melalui switch kontaktor. Kompensator daya reaktif dengan switch kontaktor menyebabkan arus inrush yang sangat besar, dapat mencapai 200 kali arus nominal. Arus inrush terjadi hanya pada saat awal arus pengisian kapasitor bank. Pada beban dinamis, maka power faktor selalu berfluktuasi dan arus inrush akan berulang-ulang, sehingga mengakibatkan kerusakan pada switch kontaktor dan kapasitor bank.

II. DASAR TEORI

A. Kualitas Daya

Daya dalam rangkaian DC sama dengan perkalian antara arus dan tegangan. Daya dalam rangkaian AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga daya rata – rata dalam satu periode sama dengan perkalian antara arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian, arus dan tegangan tidak sephase selama siklusnya seperti halnya arus bernilai negatif seraya tegangan bernilai

positif. Hal ini menghasilkan besarnya daya kurang dari perkalian I dan V.

Perkalian arus dan tegangan efektif dalam rangkaian AC dinyatakan dalam voltampere (VA) atau kilovoltampere (kVA). Satu kVA sama dengan 1.000 VA. Daya yang berguna atau daya nyata diukur dalam watt dan diperoleh jika voltampere dari rangkaian dikalikan dengan faktor yang disebut dengan faktor daya. Maka dalam rangkaian AC satu phase adalah:

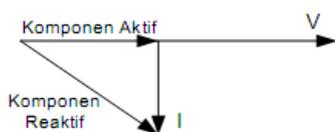
$$P(\text{dalam watt}) = V \times I \times \text{faktor daya}$$

$$\text{Faktor daya} = \frac{P(\text{dalam watt})}{V \times I}$$

Jadi faktor daya dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya nyata dalam watt dengan voltampere dari rangkaian AC. Harga faktor daya tergantung pada besarnya beda phase antara arus dan tegangan. Jika arus dan tegangan sephase, daya sama dengan $I \times V$, atau dengan kata lain faktor daya sama dengan satu. Jika arus dan tegangan berbeda phase 90° seperti dalam rangkaian kapasitif atau induktif murni, faktor daya sama dengan nol, sehingga daya nyata juga sama dengan nol. Dalam rangkaian baik yang mengandung tahanan maupun reaktansi, harga faktor daya berkisar mulai nol hingga satu, tergantung pada harga relatif dari tahanan dan reaktansi dalam rangkaian. Arus yang mengalir dalam rangkaian AC dapat dianggap terdiri dari dua komponen yaitu yang sephase dengan tegangan dan yang berbeda phase dengan tegangan hingga 90° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. komponen yang sephase disebut komponen aktif karena jika harga ini dikalikan dengan tegangan memberikan daya yang berguna atau daya nyata dari rangkaian. Komponen yang tidak sephase disebut komponen reaktif atau komponen tanpa daya, karena dari arus dan tegangan disebut daya reaktif atau voltampere reaktif dan diukur dalam VAR suatu kata yang diambil dari kata “ voltampere reactive”. Satu kilovar (kVAR) sama dengan 1.000 var. Gambar 2.1 menunjukkan bahwa semakin besar harga komponen reaktif dan semakin kecil harga komponen aktif dari harga arus total yang diberikan. Dalam Gambar 2.1 kosinus sudut phase θ adalah perbandingan arus aktif terhadap arus total, atau:

$$\cos \theta = \frac{I_{\text{aktif}}}{I}$$

$$I_{\text{aktif}} = I \times \cos \theta$$



Gambar 1 Dua komponen arus dalam rangkaian AC

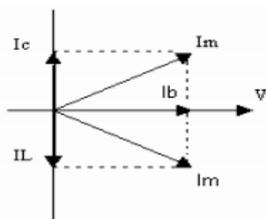
Maka, karena daya nyata adalah tegangan dikalikan dengan komponen aktif dari arus.

$$P = V \times I_{\text{aktif}}$$

$$P = VI \cos \phi$$

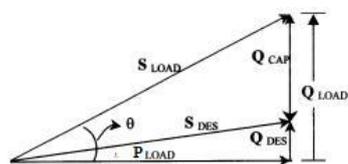
Oleh karena daya adalah EI dikalikan dengan faktor daya, maka faktor daya suatu rangkaian AC sama dengan kosinus dari sudut phase. Hubungan antara daya dalam watt (P), voltampere (VA) dan voltampere reaktif (VAR) dapat dinyatakan dengan segitiga seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.2. sudut ϕ adalah sudut phase rangkaian. Alas segitiga menyatakan daya nyata (VA), tingginya menyatakan daya reaktif (VAR), dan hipotenusanya menyatakan daya aktif (W).

Harga faktor daya tergantung dari beda phase antara arus dan tegangan. Kapasitor daya AC sebagai kompensator yang dihubungkan jaringan maka akan mengakibatkan arus beban mendahului 90 derajat, $I_c = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$. Sehingga akan mengakibatkan arus beban menjadi sephase dengan tegangan. Dimana arus beban yang tertinggal 90 derajat akan terkompensasi arus kapasitor mendahului sebesar 90 derajat, $I_b = I_b \sin(\omega t - 90^\circ + 90^\circ) = I_b \sin \omega t$. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2. 2.



Gambar 2 Diagram fasor konsep kompensator

B. Penggunaan Segitiga Daya dan Tabel Cos ϕ Untuk Analisa Perbaikan Faktor Daya



Gambar 3 Segitiga Daya

Penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif menghasilkan daya nyata.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Dimana: P = daya aktif (kW)
S = daya nyata (kVA)
Q = daya reaktif (kVAR)

Faktor daya:

$$\frac{\text{daya aktif}}{\text{daya nyata}} = \frac{P}{S} = \cos \theta$$

Daya reaktif kompensator:

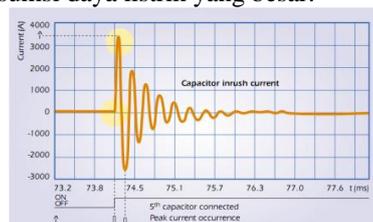
$$Q_{\text{cap}} = P \times (\tan \theta - \tan \phi)$$

Keterangan:

- P : Daya Aktif (watt)
- Qcap : Daya Reaktif Kompensator(VAR)
- θ : sudut sebelum diperbaiki
- ϕ : sudut setelah diperbaiki

C. Arus Inrush (Inrush Current)

Arus inrush merupakan suatu kondisi transien arus ketika dilakukan operasi pensaklaran pada beban dalam suatu rangkaian listrik. Arus inrush dalam ketenagalistrikan selalu diperhitungkan untuk beban-beban kapasitas besar atau peralatan listrik yang mengkonsumsi daya listrik yang besar.



Gambar 4. Arus inrush pada kapasitor bank

Dalam pensaklaran pada kapasitor bank, didapat rumusan arus inrush sebagai berikut:

$$\hat{i} = \frac{\sqrt{2} \times U_n}{\sqrt{X_C \times X_L}}$$

- Dimana: \hat{i} : Arus Inrush (Inrush current)
- U_n : Tegangan Vline-line
- X_C : reaktansi kapasitif
- X_L : reaktansi induktif

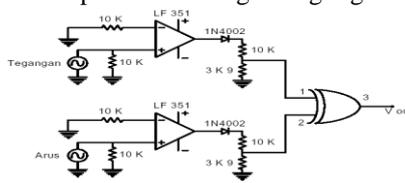
Arus inrush pada pensaklaran pada kapasitor bisa mencapai 200 kali nilai arus nominal. Hal ini terjadi karena pada saat pensaklaran frekuensi yang melalui kapasitor bank sangat besar sehingga reaktansi kapasitif menjadi sangat kecil, sesuai dengan rumusan berikut:

$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}$$

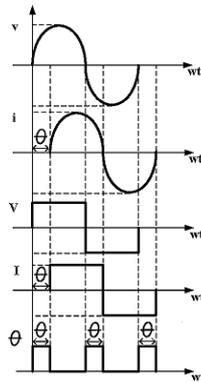
Dengan demikian arus yang melalui kapasitor bank akan sangat besar.

D. Zero Crossing Detector (Detektor Fasa)

Rangkaian ini berfungsi untuk mendeteksi perbedaan sudut fasa yang mengalir ke beban. Detektor Fasa dibuat menggunakan komparator dan gerbang logika XOR. Komparator digunakan untuk mendapatkan informasi saat nilai tegangan dan nilai arus tepat melewati titik nol. Gerbang logika XOR digunakan untuk mengetahui nilai beda sudut fasa. Nilai perbedaan sudut fasa didapat dengan menghitung selang waktu antara tegangan naik dan tegangan turun pada keluaran gerbang logika XOR.



Gambar 5. Rangkaian Detektor Fasa



Gambar 6. Input dan output pada rangkaian phase detector

III. Perencanaan soft switch dengan SCR

Soft switch menggunakan SCR yang disulut oleh mikrokontroler untuk memperbaiki power faktor dan menghilangkan arus inrush.

Cara yang digunakan untuk menghilangkan arus inrush adalah bila SCR disulut pada saat tegangan puncak (dv/dt=0).

Tegangan SCR = 0 (Vth = 0), tercapai pada saat:

$$V_{th} = V_s - V_c \quad , \text{ karena } V_c = - V_m$$

$$V_{th} = V_m \sin \omega t + V_m = V_m (1 + \sin \omega t)$$

$$\text{Maka, } \sin \omega t = -1 \rightarrow \omega t = \sin^{-1}(-1) = 270^\circ$$

Pada rangkaian tiga fase $V(t) = V_m \sin(\omega t + \theta)$. Maka tegangan SCR = 0 (Vth = 0), tercapai pada saat:

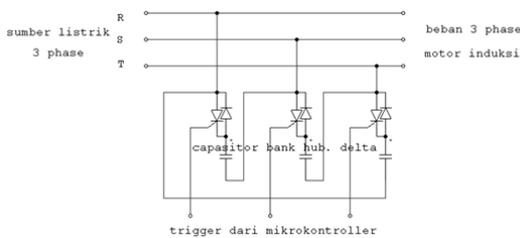
$$\sin(\omega t + \theta) = -1, \text{ dicapai pada sudut } (\omega t + \theta) = 270^\circ$$

Sehingga untuk kapasitor bank yang dirangkai secara delta, titik penyulutannya adalah:

$$\begin{aligned} \text{Sisi RS yaitu: } (\omega t + (30^\circ)) &= 270^\circ \\ \omega t &= 270^\circ - 30^\circ \\ \omega t &= 240^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sisi ST yaitu: } (\omega t + (-90^\circ)) &= 270^\circ \\ \omega t &= 270^\circ + 90^\circ \\ \omega t &= 360^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sisi TR yaitu: } (\omega t + (150^\circ)) &= 270^\circ \\ \omega t &= 270^\circ - 150^\circ \\ \omega t &= 120^\circ \end{aligned}$$



Gambar 7. Rangkaian Soft Switch SCR

IV. Hasil penelitian melalui simulasi

Penelitian melalui simulasi yang dilakukan meliputi:

1. Pembebanan motor tanpa kapasitor bank
2. Pembebanan motor dengan kapasitor bank

3. Pembebanan motor dengan metode soft switch SCR pada kapasitor bank.
4. Perbaikan Power Factor dengan soft switch SCR untuk step kapasitor bank.

Data data untuk simulasi:

$$V_{ll} = 380 \text{ volt}$$

$$\cos \theta = 0.2 \rightarrow \theta = \arccos 0.2 = 78.46^\circ$$

$$I = 2 \text{ ampere} \rightarrow I = 2 \angle 78.46$$

$$\begin{aligned} \text{Maka, } P &= \sqrt{3} \times V_{ll} \times I \times \cos \theta \\ &= \sqrt{3} \times 380 \times 2 \times 0.2 = 263.27 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{3} \times V_{ll} \times I \times \sin \theta \\ &= \sqrt{3} \times 380 \times 2 \times 0.98 = 1289.76 \text{ VAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} \times V_{ll} \times I \\ &= \sqrt{3} \times 380 \times 2 = 131,64 \text{ VA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \frac{V_{ln}}{I} \\ &= \frac{220 \angle 0}{2 \angle 78.46} = 22 - j107.78 \rightarrow R = 22 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{X_L}{2\pi f} \\ &= \frac{107.78}{100\pi} = 343,074395 \text{ mH} \end{aligned}$$

Perhitungan kapasitor bank untuk mencapai $\cos \theta = 1$ sebagai berikut:

$$\text{pf sebelum} = 0,2 \text{ (lag)} \rightarrow \theta_1 = 78,46^\circ$$

$$\text{pf target} = 1 \rightarrow \theta_2 = 0^\circ$$

$$\begin{aligned} Q_{cap} &= P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \\ &= 263,27 \cdot (\tan 78,46^\circ - \tan 0^\circ) \\ &= 1289,76 \text{ VAR} \end{aligned}$$

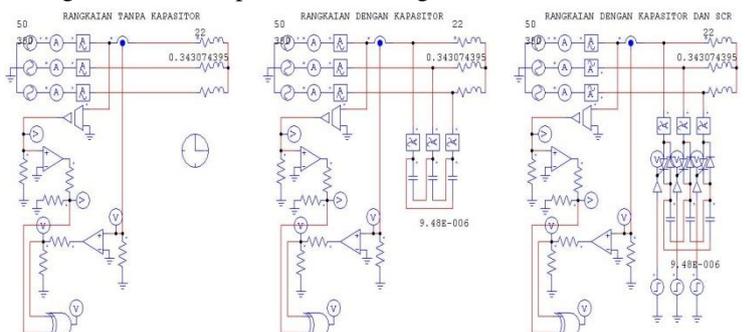
$$\begin{aligned} Q_{step} &= \frac{Q_{cap}}{4} \\ &= \frac{1289,76 \text{ VAR}}{4} \\ &= 322,44 \text{ VAR} \end{aligned}$$

Capasitor delta conection

$$\begin{aligned} C_{step} &= \frac{Q_{cap}}{3 \cdot V_{ll}^2 \cdot \omega} \\ &= \frac{322,44}{3 \cdot 380^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} \\ &= 2,369 \mu\text{F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{total} &= C_{step} \times 4 \\ &= 9,48 \mu\text{F} \end{aligned}$$

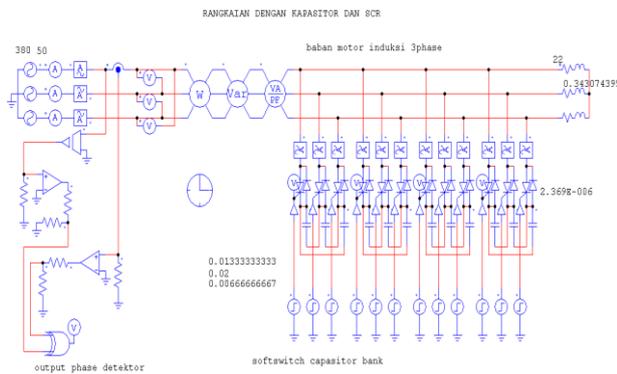
Rangkaian simulasi pembebanan dengan PSIM:



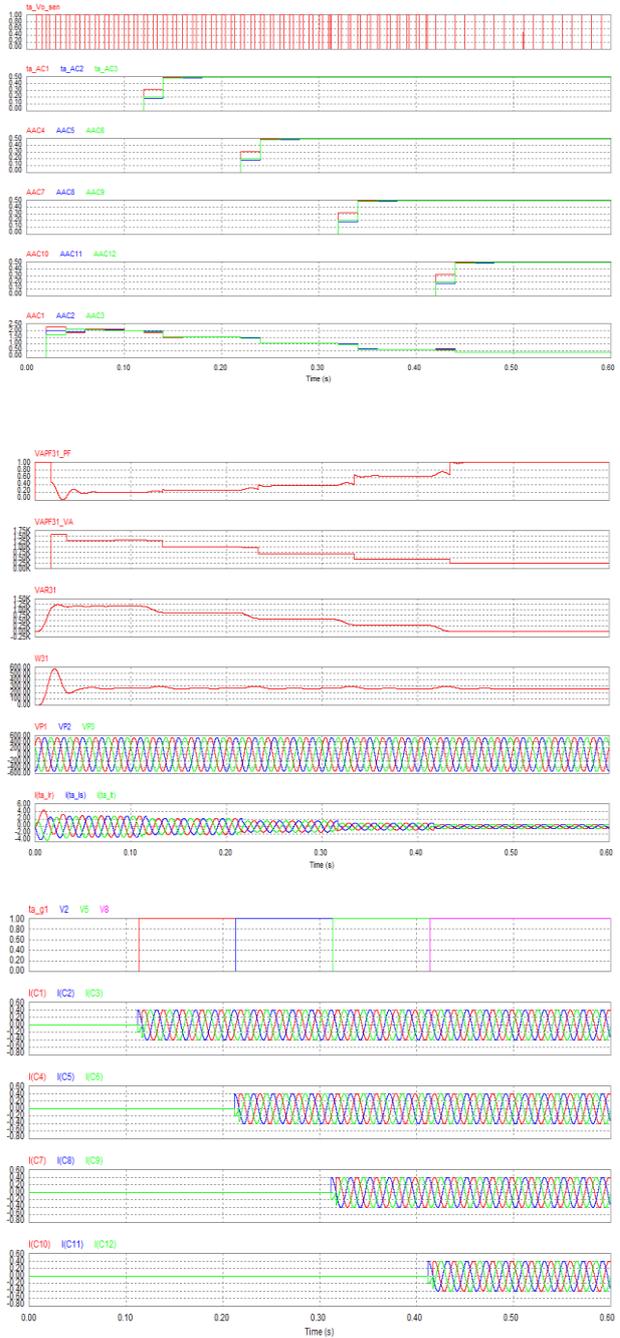
Hasil rangkaian zero crossing dari ketiga penelitian melalui simulasi.



Rangkaian simulasi PFC step capacitor bank dengan PSIM:



Hasil rangkaian zero crossing dari penelitian melalui simulasi.



Gambar 11. Hasil simulasi beda fasa dengan rangkaian zero crossing

Tabel 1. Hasil simulasi rangkaian pembebanan menggunakan PSIM

No	Rangkaian	PF	\hat{i} (A)
1.	Pembebanan motor tanpa kapasitor bank	0.203	Tanpa kapasitor bank
2.	Pembebanan motor dengan kapasitor bank	1	512,22
3.	Pembebanan motor dengan metode soft switch SCR pada kapasitor bank.	1	1,6

Hasil diatas (setelah dipasang capasitor bank) akan semakin baik dengan perhitungan capasitor bank yang tepat. Dan dengan metode soft switch SCR pada capasitor bank maka akan menghilangkan arus inrush, dan sudut penyulutan SCR mempengaruhi adanya arus inrush yang dihilangkan.

Tabel 2.
Hasil simulasi rangkaian step capasitor bank menggunakan PSIM

No	Rangkaian	Step Cap.	PF	VA	VAR	W
1	Pembebanan motor	0	0.203	1304.4	1163.2	263.28
2	dengan metode soft switch SCR pada capasitor bank.	1	0.265	992.02	871.57	262.72
3		2	0.382	688.13	580	262.7
4		3	0.639	411.2	288.44	262.65
5		4	1	262.47	-3.1	262.51

Dari Tabel diatas menerangkan tentang nilai daya nyata (VA) yang semakin kecil ketika step soft switch capasitor bank semakin banyak, menunjukkan bahwa terjadi perbaikan power faktor. Dengan daya aktif (W) yang sama maka cos phi akan mendekati nilai unity (cos phi = 1) ketika step capasitor bank maksimal. Ketika terjadi pembebanan pada motor maka cos phi akan naik sehingga tidak perlu step capasitor bank secara maksimal. Dengan metode soft switch SCR pada capasitor bank maka tidak akan menimbulkan arus inrush, sehingga nilai cos phi yang diharapkan adalah unity (cos phi=1).

V. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil percobaan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada pembebanan motor induksi 3 phase tanpa menggunakan capasitor bank menghasilkan power faktor sebesar 0,203 dan menghasilkan daya output 263,28 watt.
2. Pada pembebanan motor induksi 3 phase dengan menggunakan capasitor bank menghasilkan power faktor sebesar 1, akan tetapi menghasilkan arus inrush yang besar 512,22 ampere.
3. Pada pembebanan motor induksi 3 phase dengan metode soft switch SCR pada capasitor bank menghasilkan power faktor sebesar 1 dan akan menghilangkan arus inrush sampai menjadi 1,6 ampere dengan sudut penyulutan SCR 240° , 360° dan 120° .
4. Pada pembebanan motor induksi 3 phase dengan menggunakan 4 step capasitor bank dapat digunakan untuk memperbaiki power faktor untuk beban motor dinamis. Ketika motor mengalami pembebanan maka step capasitor bank tidak maksimal.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Achmad Fanani, "Power faktor Regulator Menggunakan PLC(HARDWARE)", Proyek Akhir PENS – ITS, 2001.
- [2] Rety Silvana, Florentina, "Perbaikan Kualitas Daya menggunakan Soft Switch Static Var Kompensator untuk beban dinamik pada industri", PENS-ITS, Surabaya, 2006.
- [3] Indhana Sudiharto, ST, MT, "Desain Soft Switched Static Var Compensator Untuk Mengurangi Inrush Current Pada Capasitor Bank", Tesis Teknologi Industri – ITS, 2006.
- [4] Arif, Faisyal, "Power Faktor Regulator menggunakan PLC Zelio", PENS-ITS, Surabaya, 2007.
- [5] ____, "Power Faktor Corection (EPCOS)", Product Profile 2005
- [6] www.google.com