

# ANALISIS PEMODELAN ARUS TRANSIEN SAAT SWITCHING KAPASITOR BANK PADA RUMAH SAKIT ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG

Febrie Ardiyanto<sup>\*</sup>), Dedi Nugroho, dan Jenny Putri Hapsari

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang  
Jl. Kaligawe Raya No.KM. 4, Semarang, Indonesia

<sup>\*</sup>E-mail: febrieardiyanto@std.unissula.ac.id

## Abstrak

Fenomena tegangan transien pada sistem distribusi daya adalah *switching capacitor bank* yang digunakan konsumen untuk perbaikan faktor daya. Tegangan transien menimbulkan arus transien. Arus maksimum transien (arus *inrush*) dapat menimbulkan kerusakan sistem kontrol, trip pada *adjustable speed drive*, dan kerusakan peralatan elektronik. Penelitian ini bertujuan mengetahui besarnya arus *inrush* pada *switching capacitor bank* di Rumah Sakit Islam Sultan Agung Semarang dan mereduksinya menggunakan induktor seri pada kapasitor bank. Simulasi Simulink Matlab digunakan untuk pemodelan *switching kapasitor bank*. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan terlihat kebutuhan daya aktif rata-rata 71.93 kW, daya reaktif rata-rata 78.41 kVAR dengan faktor daya rata-rata 0.673. Pemasangan kapasitor bank memperbaiki faktor daya menjadi 0.95 sehingga kebutuhan daya reaktif dan daya aktif turun menjadi 21.7 kVAR dan 66.47 kW. Dampak pemasangan kapasitor bank tersebut menimbulkan arus transien saat terjadi *switching* dengan arus *inrush* mencapai antara 7 - 10 kali arus rms beban. Pengurangan arus *inrush* dilakukan menggunakan induktor seri pada kapasitor bank dengan nilai 2.8 mH agar faktor daya tetap sekitar 0.95. Hasilnya saat terjadi *switching capacitor bank* arus *inrush* mencapai 918.75 Ampere sedangkan saat digunakan induktor seri turun menjadi 558.25 A atau turun sebesar 39.24 %. Arus *inrush* menurun menjadi 4 - 6 kali arus rms beban.

*Kata kunci : Switching capacitor bank, arus transient, arus inrush*

## Abstract

*Transient voltages phenomenon that often occurs in power distribution systems is the switching capacitor banks used by consumers to improve the power factor. The transient voltage causes transient current. The maximum transient current (inrush current) can cause control system malfunction, adjustable speed drive trip, and electronic equipment malfunction. This research aims to determine the magnitude of the inrush current when the capacitor bank switching occurs at Sultan Agung Islamic Hospital, and reduce the inrush current through the use of a series inductor on the capacitor bank. The research method is carried out by simulation through the modeling of switching capacitor bank using Simulink Matlab software. Based on the measurement, the average active power requirement is 71.93 kW, the average reactive power is 78.41 kVAR with power factor 0.673. The installation of capacitor banks improved the power factor to 0.95 whilst the reactive power and active power demand decreased to 21.7 kVAR and 66.47 kW. The the capacitor bank switching produces inrush current between 7 - 10 times the load rms current. A 2.8 mH series inductor on a capacitor bank is selected to reduce inrus current while maintaining the power factor around 0.95. The results found inrush current reaches 918.75 Ampere which drops to 558.25 A or a decrease by 39.24% with the use of series inductor. Overall, it decreases the inrush current to 4 - 6 times the load rms current.*

*Key words: Switching capacitor bank, transient current, inrush current*

## 1. Pendahuluan

Tegangan transien terjadi karena fenomena pelepasan energi tersimpan secara tiba – tiba yang disebabkan oleh berbagai peristiwa seperti surja petir, surja hubung, energisasi transformator, *switching kapasitor bank*, dan sebagainya. Tegangan transien dapat menimbulkan arus

*inrush* yang sangat tinggi diatas arus maksimum normalnya, akibatnya dapat menimbulkan berbagai masalah seperti kerusakan sistem kontrol, kerusakan peralatan elektronik, *trip adjustable speed drive*, dan sebagainya. Pada umumnya arus *inrush* yang sering terjadi disebabkan oleh *switching capacitor bank* yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya. Beban industri

umumnya berkisar antara 0.6 - 0.7 sehingga diperlukan perbaikan faktor daya melalui pemasangan kapasitor bank. Pada dasarnya kapasitor bank ini berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif disisi beban, sehingga daya reaktif yang ditarik dari sumber daya PLN menjadi berkurang sehingga akan memperbaiki nilai faktor daya tersebut. Secara *real time* nilai daya tersebut berubah-ubah setiap saat, hal ini dikarenakan adanya perubahan beban listrik, oleh karena itu diperlukan sejumlah kapasitor yang dihubungkan dan dilepas melalui *switching* agar faktor daya yang dikehendaki konstan [1]. Aplikasi *switching capacitor bank* secara *back to back* pada sistem penyulang tegangan menengah memperlihatkan bahwa semakin besar nilai kapasitor yang terhubung ke jaringan semakin tinggi nilai arus inrush [2]. Untuk mengurangi arus inrush akibat *switching* kapasitor telah dilakukan oleh sejumlah peneliti melalui penelitian secara simulasi dengan menggunakan berbagai metode seperti *reaktor induktor* [2], *synchronous switch* [3], *pre insertion resistor* dan *pre insertion inductor* [4][5], *resistive capacitor switching transient limiter* [6-8], *pre insertion impedans* [9], maupun soft switching [10-11].

Berdasarkan hasil simulasi dari berbagai metode diatas arus inrush dapat direduksi menjadi rendah sehingga aman bagi peralatan listrik Rumah Sakit Islam Sultan Agung yang merupakan beban komersial yang memiliki beban-beban kritis berupa peralatan medis, oleh karena itu memerlukan kualitas daya yang baik. Daya listrik terpasang di rumah sakit ini mencapai 170 kVA dengan beban harian yang selalu berubah-ubah setiap saat.

Sebagian besar beban-beban ini bersifat induktif terutama beban berupa motor-motor induksi yang dipakai untuk *water pump*, *water treatment*, *fan*, *blower*, *Air conditioner*, dan sebagainya, sehingga faktor dayanya rendah [12-13]. Untuk mengurangi kebutuhan daya reaktif dan mengoptimalkan kapasitas daya, digunakan kapasitor bank tipe *switched* agar nilai faktor daya tetap terjaga konstan, namun menimbulkan masalah berupa terjadinya *switching* setiap terjadi perubahan faktor daya [14-15]. Akibat adanya *switching* akan menimbulkan fenomena tegangan transien dan arus inrush yang tinggi. Arus inrush yang terlalu tinggi bisa berdampak pada kerusakan peralatan medis, trip peralatan kontrol atau *circuit breaker*. Berdasarkan permasalahan tersebut penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besarnya arus inrush tersebut dan memberikan solusi untuk mengurangi arus shunt melalui metode pemasangan induktor seri dengan kapasitor bank untuk membatasi arus inrush tersebut.

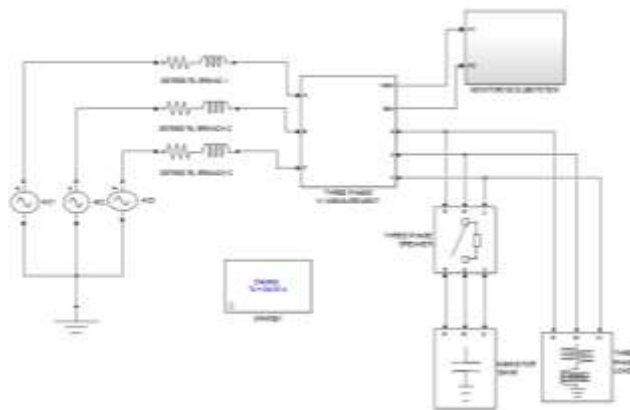
## 2. Metode

Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan sistem secara grafis dan simulasi menggunakan software Simulink Matlab. Data-data primer diambil melalui

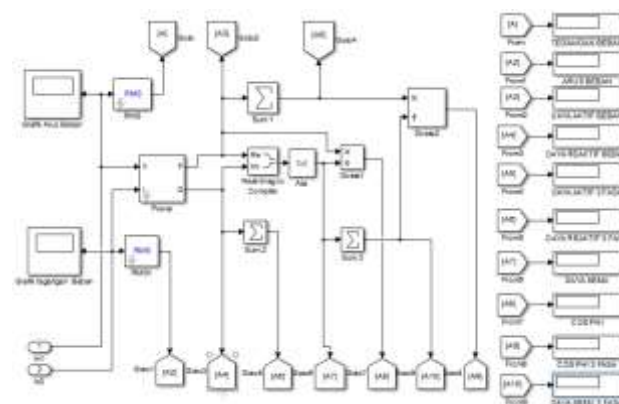
pengukuran langsung pada panel MDP rumah sakit, berupa data beban harian seperti daya, tegangan, dan faktor daya. Untuk mendapatkan arus inrush saat terjadinya *switching* dilakukan melalui pembuatan model rangkaian *switching capacitor bank* melalui pemograman grafis Simulink Matlab. Ada dua tahap dalam penelitian ini. Tahap pertama perancangan model rangkaian *switching capacitor bank*. Melalui rangkaian ini dapat disimulasikan gelombang arus transien yang terjadi saat *switching capacitor bank*. Berdasarkan hasil simulasi ini dapat diketahui nilai arus inrush. Jika nilai arus inrush tinggi maka perlu dibatasi atau direduksi melalui pemasangan reaktor induktor seri pada kapasitor bank.

### 2.1. Pemodelan Sistem Switching Capacitor Bank

Kapasitor bank pada Rumah Sakit Islam Sultan Agung dipasang secara paralel langsung dari sumber daya PLN, sedangkan pengukuran dilakukan pada MDP panel sehingga merupakan pengukuran beban total rumah sakit tersebut. Dengan demikian model *switching capacitor bank* dapat disederhanakan seperti diperlihatkan dalam Gambar 1. Monitoring subsystem ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Pemodelan *switching capacitor bank*



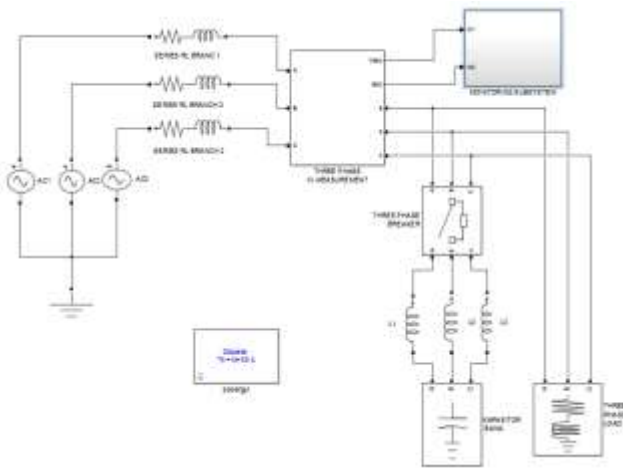
Gambar 2. Monitoring subsystem

Simulasi dilakukan dengan memberikan parameter-parameter tegangan, resistansi konduktor, kapasitor bank

dan beban sesuai dengan hasil pengukuran dan perhitungan. Melalui proses *switching* pada rangkaian *circuit breaker* dapat ditentukan nilai arus inrush tersebut untuk setiap perubahan beban.

**2.2. Pemodelan Switching Capacitor Bank Dengan Penambahan induktor Seri**

Tahap ke dua adalah pemasangan induktor seri pada kapasitor bank, oleh karena itu diperlukan model rangkaian *switching capacitor bank* dengan penambahan induktor seri. Berdasarkan hasil simulasi ini dapat diketahui pengurangan arus inrush saat terjadi *switching capacitor bank*. Pengurangan besarnya arus inrush pada penelitian ini menggunakan reaktor berupa induktor seri yang yang dihubungkan dengan kapasitor bank, seperti ditunjukkan di Gambar 3.



Gambar 3. Pemodelan *switching capacitor bank* dengan induktor seri

**3. Hasil dan Analisis**

**3.1. Data Pengukuran dan Perhitungan**

Data hasil pengukuran daya aktif dan faktor daya pada panel MDP diperlihatkan pada Tabel 1. Tabel 1 menyajikan data berupa hasil pengukuran daya aktif dan faktor daya pada masing – masing fasa. Data diambil di hari kerja rumah sakit mulai pukul 6.00 sampai pukul 20.00 WIB

Tabel 1. Tabel Hasil Pengukuran Daya Nyata dan  $\cos\phi$

Pukul	P (kW)			$\cos\phi$		
	R	S	T	R	S	T
06.00	13.8	28.1	27.9	0.51	0.5	0.99
08.00	13.4	26.9	18.2	0.518	0.509	0.99
10.00	26.6	26.3	52.4	0.52	0.507	0.99
12.00	13.3	13.1	54.9	0.519	0.504	0.99
14.00	13.3	12.9	25.9	0.519	0.503	0.99
16.00	13.8	13.3	55.2	0.519	0.503	0.99
18.00	13.8	28.1	27.6	0.513	0.501	0.99
20.00	14.2	14.1	28.4	0.505	0.499	0.99

Berdasarkan Tabel 1 dapat dihitung daya total kebutuhan rumah sakit sebagai berikut:

a. Daya aktif :

$$P_{total} = P_r + P_s + P_t \tag{1}$$

dengan :

- $P_{total}$  = Daya aktif 3 fasa
- $P_r$  = daya fasa R (kW)
- $P_s$  = daya fasa S (kW)
- $P_t$  = daya fasa T (kW)

Melalui persamaan (1) dapat ditentukan kebutuhan daya total pada pukul 6.00 (melihat data dari Tabel 1) adalah:

$$P_{total} = P_r + P_s + P_t$$

$$P_{total} = 13.3 + 28.1 + 27.9$$

$$P_{total} = 69.8 \text{ kW}$$

b. Daya Semu:

$$S_{total} = \left( \frac{P_s}{\cos\phi_s} \right) + \left( \frac{P_r}{\cos\phi_r} \right) + \left( \frac{P_t}{\cos\phi_t} \right) \tag{2}$$

dengan :

- $S_{total}$  = daya Semu 3 fasa (kVA)
- $\cos\phi_s, \cos\phi_r, \cos\phi_t$  = faktor daya setiap fasa

Kebutuhan daya semu total pada pukul 6.00 dapat ditentukan menggunakan persamaan (2) dan melihat data dari Tabel 1, yaitu:

$$S = \left( \frac{P_s}{\cos\phi_s} \right) + \left( \frac{P_r}{\cos\phi_r} \right) + \left( \frac{P_t}{\cos\phi_t} \right)$$

$$S = \left( \frac{13.8}{0.51} \right) + \left( \frac{28.1}{0.5} \right) + \left( \frac{27.9}{0.99} \right)$$

$$S = 111.4406 \text{ kVA}$$

c. Daya Reaktif:

$$Q_{total} = \sqrt{S_{total}^2 - P_{total}^2} \tag{3}$$

dengan:

- $Q_{total}$  = daya reaktif (kVAR)
- $S_{total}$  = daya semu (kVA)
- $P_{total}$  = daya aktif (kW)

Dengan menggunakan persamaan (3) dan data di Tabel 1 dapat dihitung Daya reaktif total pada pukul 6.00 adalah :

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

$$Q = \sqrt{111.44^2 - 69.8^2}$$

$$Q = 86.873 \text{ kVAR}$$

d. Faktor daya :

$$\cos\phi = \frac{P_{total}}{S_{total}} \tag{4}$$

Berdasarkan hasil perhitungan bahwa daya aktif total adalah 69.8 kW dan daya semu total adalah 111.44 kVA, dengan demikian dapat dihitung faktor daya beban total dengan persamaan (4) yaitu :

$$\cos\phi = \frac{P_{total}}{S_{total}}$$

$$\cos\phi = \frac{69.8 \text{ kW}}{111.4406 \text{ kVA}}$$

$$\cos\phi = 0.626342$$

Hasil perhitungan kebutuhan beban total selengkapnya diperlihatkan dalam Tabel 2.

**Tabel 2. Kebutuhan Beban di Rumah Sakit Islam Sultan Agung Semarang**

Pukul	Daya			cosφ
	P (kW)	S (kVA)	QL (kVAR)	
06.00	69.8	111.441	86.873	0.626
08.00	58.5	97.101	77.501	0.602
10.00	105.3	155.957	115.041	0.675
12.00	81.3	107.073	69.677	0.759
14.00	52.1	77.434	57.285	0.673
16.00	82.3	108.789	71.145	0.757
18.00	69.5	110.867	86.378	0.627
20.00	56.7	85.062	63.408	0.667

Tabel 2 menunjukkan kebutuhan beban di Rumah Sakit Islam Sultan Agung Semarang dari pukul 06.00 WIB s/d 20.00 WIB. Pada pukul 10.00 WIB merupakan beban terbesar sebesar 105.3 kW dan pada pukul 20.00 WIB merupakan beban terendah sebesar 56.7 kW. Faktor daya beban di Rumah Sakit Islam Sultan Agung terlihat cukup rendah dan bervariasi antara 0.602 – 0.759. Berdasarkan Tabel 2 dapat dihitung rata-rata pemakaian daya yaitu: daya aktif 71.93 kW, daya semu 106.72 kVA, daya reaktif 78.41 kVAR, dan faktor daya rata-rata 0.673.

### 3.2. Perbaikan Faktor Daya

Tabel 2 memperlihatkan hasil perhitungan faktor daya yang cukup rendah, maka diperlukan perbaikan faktor daya dengan pemasangan kapasitor bank. Besarnya kapasitor yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya:

$$Q_c = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \tag{5}$$

dengan :

- $Q_c$  = daya reaktif kapasitor (kVAR)
- $\phi_1$  = sudut daya sebelum perbaikan
- $\phi_2$  = sudut daya setelah perbaikan

Sebelum dikompensasi nilai faktor daya saat pukul 06.00 adalah 0.626 (sudut daya 5.12<sup>0</sup>) dan dengan nilai faktor daya dikehendaki 0.98 (sudut daya 18.19<sup>0</sup>) maka dengan menggunakan persamaan (5), dapat dihitung nilai daya reaktif kapasitor sebagai berikut:

$$Q_c = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$

$$Q_c = 69.8(\tan 5.12^0 - \tan 18.19^0)$$

$$Q_c = 69.8 \text{ kW}(1.24 - 0.32)$$

$$Q_c = 63.9 \text{ kVAR}$$

Hasil perhitungan kapasitor selengkapnya diperlihatkan dalam Tabel 3 yang memperlihatkan kebutuhan daya reaktif kapasitor yang berubah-ubah sesuai dengan perubahan beban. Agar kebutuhan daya reaktif tersebut terpenuhi dengan menjaga nilai faktor daya tetap, maka diperlukan *switching* kapasitor yang akan menghubungkan dan melepas sejumlah kapasitor mengikuti perubahan beban.

**Tabel 3. Hasil Perhitungan Nilai Kompensasi Kapasitor Bank**

Pukul	P (kW)	Qc (kVAR)
06.00	69.8	63.931
08.00	58.5	58.273
10.00	105.3	80.431
12.00	81.3	42.955
14.00	52.1	40.161
16.00	82.3	44.095
18.00	69.5	63.535
20.00	56.7	44.772

Berdasarkan hasil perhitungan kapasitor bank di Tabel 3, maka melalui rangkaian pemodelan *switching capacitor bank* seperti pada Gambar 1, dapat ditentukan nilai-nilai daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya setelah dikompensasi dengan kapasitor bank. Hasil simulasi dan perbandingan antara sebelum dikoreksi dan setelah dikoreksi nilai faktor dayanya diperlihatkan dalam Tabel 4.

**Tabel 4. Hasil Simulasi Perbaikan Faktor Daya (cos φ) Sebelum dan Sesudah Penambahan Kapasitor**

Pukul	PL1 (kW)	QL1 (KVAR)	Cos φ1	PL2 (kW)	QL2 (kVAR)	Cos φ2
06.00	69.8	86.873	0.626	65.15	21.3	0.95
08.00	58.5	77.501	0.602	55.2	18.1	0.95
10.00	105.3	115.041	0.675	94.5	30.9	0.95
12.00	81.3	69.677	0.759	74.7	24.5	0.95
14.00	52.1	57.285	0.673	49.8	16.2	0.95
16.00	82.3	71.145	0.757	75.6	24.8	0.95
18.00	69.5	86.379	0.627	63.2	21.2	0.95
20.00	56.7	63.408	0.667	53.6	17.5	0.95

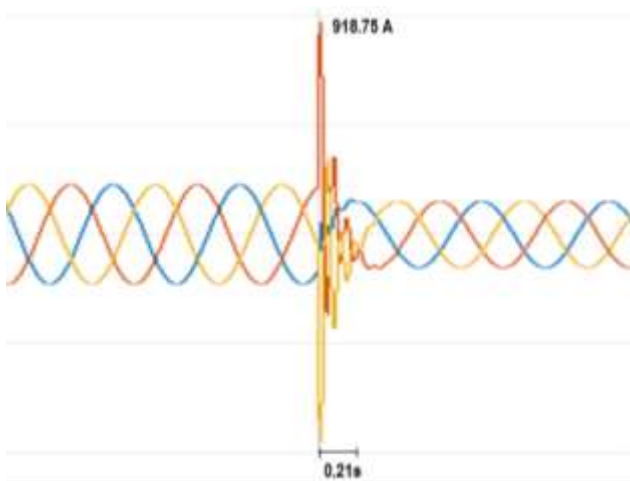
Berdasarkan Tabel 4 tersebut dapat dihitung pemakaian daya rata-rata setelah dikompensasi dengan kapasitor bank yaitu: daya aktif = 66.47 kW, daya reaktif = 21.7 kVAR, daya semu = 69.95 kVA, dan faktor daya rata-rata = 0.95. Dengan demikian pemasangan kapasitor bank dapat mereduksi kebutuhan daya reaktif dari 78.41 kVAR menjadi 21.7 kVAR. Disamping itu terjadi pengurangan daya aktif meskipun relatif rendah yaitu dari 71.93 kW menjadi 66.47 kW. Hal ini karena adanya perbaikan profil tegangan akibat pengurangan daya reaktif, sementara daya semu berkurang dari 106.72 kVA menjadi 69.95 kVA.

### 3.3. Simulasi Switching Capacitor Bank

Pada simulasi *switching capacitor bank* pada Gambar 1 dapat ditentukan juga nilai arus inrush yang merupakan arus maximum saat terjadi arus transien akibat proses *switching capacitor bank*. Besarnya arus inrush hasil simulasi diperlihatkan dalam Tabel 5. Tabel 5 memperlihatkan nilai arus beban normal dan arus transien maksimum (arus inrush). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa faktor daya hasil kompensasi daya reaktif adalah konstan 0.95 meskipun terjadi perubahan beban, namun yang menjadi permasalahan adalah besarnya arus inrush saat *switching* sangat tinggi berkisar antara 7 - 10 kali arus rms beban.

Tabel 5. Hasil Simulasi Switching Kapasitor

Pukul	P <sub>(Load)</sub> (KW)	Q <sub>Load</sub> (KVAR)	Cos φ	V (Volt)	I <sub>(Load)</sub> (A)	I <sub>(inrush)</sub> (A)	Waktu transient (s)
06.00	65.15	21.3	0.95	211.5	108	980	0.21
08.00	55.2	18.1	0.95	212	91	919	0.21
10.00	94.5	30.9	0.95	207	159.9	1100	0.21
12.00	74.7	24.5	0.95	210	124.8	850	0.21
14.00	49.8	16.2	0.95	213	81.2	800	0.21
16.00	75.6	24.8	0.95	210	126	880	0.21
18.00	63.2	21.2	0.95	211	107.6	970	0.21
20.00	53.6	17.5	0.95	213	88.2	850	0.21



Gambar 4. arus inrush tanpa reaktor

Besarnya arus inrush ini dipengaruhi oleh sistem dan beban itu sendiri. Gambar 4 merupakan hasil simulasi yang menunjukkan tingginya nilai inrush yaitu mencapai 918.75 A sementara arus maksimum normal adalah 91 A atau naik mencapai 10 kali arus rms beban.

### 3.4. Simulasi Switching Capacitor Bank Dengan Reaktor Induktor Seri

Reaktor induktor seri merupakan induktor yang dihubungkan secara seri dengan masing-masing kapasitor guna mereduksi arus inrush. Pemilihan nilai induktor harus ditentukan sedemikian rupa agar nilai faktor daya berada pada nilai yang dikehendaki.

Nilai kapasitor:

$$C = \frac{Q_c}{\omega(V_n)^2} \tag{6}$$

dengan:

- C = kapasitor (farad)
- Q<sub>C</sub> = daya reaktif kapasitor (kVAR)
- ω = kecepatan sudut (rad/s)
- V<sub>n</sub> = tegangan *phase to netral*.

Kapasitas kapasitor bank di Rumah Sakit Islam Sultan Agung adalah 400 kVAR yang terdiri atas 12 buah kapasitor. Daya reaktor kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (7).

$$Q_c = \left( \frac{\text{Nilai Kapasitas Kapasitor}}{\text{Jumlah Kapasitor}} \right) \tag{7}$$

Dengan memasukkan nilai kapasitas dan jumlah kapasitor bank yang ada di Rumah Sakit Islam Sultan Agung ke persamaan (7), maka didapatkan nilai daya reaktor kapasitor:

$$Q_c = \frac{400000}{12} = 33.33 \text{ kVAR}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\omega = 2 \times 3.14 \times 50$$

$$\omega = 314$$

Jadi nilai C dapat ditentukan melalui persamaan (6), yaitu:

$$C = \frac{Q_c}{\omega(V_n)^2}$$

$$C = \frac{3333}{314 \times 220^2}$$

$$C = 0.0021 \text{ F}$$

Nilai reaktansi kapasitif dapat dihitung menggunakan persamaan (8):

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \tag{8}$$

Dengan menggunakan persamaan (8) dan memasukkan nilai kapasitor, maka didapatkan nilai reaktansi kapasitif, yaitu:

$$X_C = \frac{1}{314(0.0021)} = 1.51 \Omega$$

Nilai reaktor yang dipakai untuk mereduksi arus inrush harus disesuaikan dengan standar internasional JIS-C-4092 yaitu 6%.

Nilai reaktansi induktor didapat dengan persamaan (9):

$$\frac{X_L}{X_C} \times 100\% = 6\% \tag{9}$$

Sehingga nilai reaktansi induktor adalah:

$$X_L = \frac{6\%}{100\%} \times X_C$$

$$X_L = \frac{6}{100} \times 1.51$$

$$X_L = 0.0906 \Omega$$

Nilai induktor didapat dengan persamaan (10):

$$X_L = 2\pi f L \tag{10}$$

Sehingga nilai induktor adalah:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

$$L = \frac{0.0906}{314} = 0.0028H$$

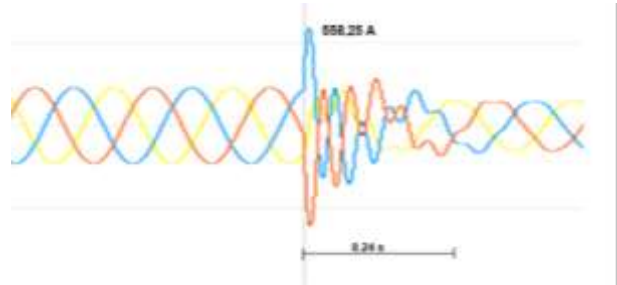
Sehingga nilai induktor seri yang digunakan untuk reaktor ini adalah 2.8 mH per fasa. Selanjutnya dengan memakai rangkaian pemodelan *switching capacitor bank* dengan induktor seri pada Gambar 3, maka diperoleh hasil seperti diperlihatkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Simulasi Setelah Penambahan Reaktor

Pukul	P <sub>(load)</sub> (KW)	Q <sub>(load)</sub> (KVAR)	Cos φ	V (Volt)	I <sub>load</sub> (A)	I <sub>(inrush)</sub> (A)	Waktu transient (s)
06.00	65.15	18.9	0.96	211	107	580	0.240
08.00	55.2	16	0.96	212	90	558	0.245
10.00	94.5	27.2	0.96	207	158	690	0.235
12.00	74.7	23.4	0.954	210	124	535	0.24
14.00	49.8	15.2	0.955	213	80	475	0.245
16.00	75.6	23.7	0.954	210	125.7	540	0.245
18.00	63.2	18.8	0.96	211.7	106	590	0.240
20.00	53.6	16.4	0.95	213	87.52	500	0.214

Tabel 6 menunjukkan bahwa pemakaian induktor seri pada kapasitor bank mampu mereduksi arus inrush

menjadi 4 – 6 kali arus maksimum kondisi normal (*steady state*) dibandingkan yang sebelumnya antara 7 – 10 kali arus rms beban.



Gambar 5. Arus inrush setelah memakai reaktor

Gambar 5 memperlihatkan adanya penurunan arus inrush yang semula 918.75 A (10 kali arus rms beban) dengan waktu pemulihan 0.21 detik menjadi 558.25 A (6 kali arus rms beban) dengan waktu pemulihan 0.24 detik. Dapat dilihat bahwa terjadi penurunan arus inrush sekitar 39.24% sedangkan waktunya bertambah sekitar 14.29% ini. Pemasangan reaktor induktor harus dihitung sedemikian rupa agar tidak terjadi perubahan pada faktor daya seperti diperlihatkan dari hasil simulasi yang mana setelah menggunakan reaktor nilai faktor daya antara 0.95 – 0.96.

#### 4. Kesimpulan

Beban listrik rata-rata di Rumah Sakit Islam Sultan Agung membutuhkan daya aktif 71.93 kW, daya reaktif 78.41 kVAR, faktor daya 0.673. Faktor daya diperbaiki menjadi 0.95 sehingga terjadi pengurangan daya reaktif secara signifikan menjadi 21.7 kVAR. Dampak yang ditimbulkan dari proses *switching capacitor bank* adalah timbulnya arus inrush yang mencapai 7-10 kali arus rms beban. Induktor seri yang dipasang pada kapasitor bank dapat mereduksi besarnya arus inrush menjadi 4-6 kali arus rms beban. Pemasangan induktor seri mampu mengurangi arus inrush saat terjadi *switching capacitor bank* sebesar 39.24% yaitu yang awalnya 918.75 A menjadi 558.25 A.

#### Referensi

[1] A. U. Ulya, “Analisis dan Simulasi Pengaruh Pemasangan Capasitor Bank untuk Perbaikan Faktor Daya menggunakan Simulink pada Sistem Tenaga Listrik di PT. BOGOWONTO PRIMALARAS,” *Media Elektr.*, vol. 12, no. 1, 2019.

[2] I. Hidayat, N. H. Yuninda, and I. Arif Raharjo, “Analisis Arus Inrush saat Switching Kapasitor Bank pada Busbar 2 (Suatu Studi di PT. PLN (persero) Gardu Induk Gandul),” *J. Electr. Vocat. Educ. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 16–22, 2019.

[3] G. Rajasekhar and G. Sarma, “Application of Synchronous Switch for Fault Analysis During Switching of Capacitor Banks,” *Indian J.Sci.Res.*, vol. 17, no. 2, pp. 196–202, 2018.

- [4] S. Katyara, A. Ahmed Hashmani, and B. Shankar Chowdhry, "Analysis and Mitigation of Shunt Capacitor Bank Switching Transients on 132 kV Grid Station, Qasimabad Hyderabad," *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 34, no. July, pp. 291–300, 2015.
- [5] R. Deshmukh and V. R. Aranke, "Approaches to Limit the Effect of Capacitor Banks Switching Transients in Power Systems," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 7, no. 11, pp. 4015–4022, 2018.
- [6] D. S. Sargar, S. G. Kanade, and S. S. Kunte, "Mitigation of Power Capacitor Switching Transients using Resistive Capacitive Switching," *Int. J. Curr. Eng. Sci. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 55–58, 2018.
- [7] D. Frebiandi, and A. Supardi. "Analisis Arus Inrush Akibat Switching Kapasitor Bank di Gardu Induk Sragen." Disertasi PhD., Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2018.
- [8] Nofendri. "Simulasi Rancangan Rangkaian Peminimuman Inrush Current Pada Pensaklaran Kapasitor Bank." PhD diss., Universitas Andalas, 2018.
- [9] T. M. Mohan and T. R. Durga, "Simulation of Energization and De-Energization of Capacitor Banks and Mitigation of Transient Overvoltages," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 10, pp. 713–720, 2019.
- [10] P. Yudhatama Dwi. "Pengurangan Arus Inrush pada Capacitor Bank Menggunakan Metode Soft Switching." PhD diss., Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [11] Hendik, Eko HS, Chusna Arif Yahya, and Sudiharto Indhana. "Teknik Pengurangan Arus Inrush dan Pengurangan Harmonisa Pada Kapasitor Bank Untuk Beban Non Linier." *Emitter 1*, no. 1 (2010).
- [12] Yani, Ahmad. "Pemasangan Kapasitor Bank untuk Perbaikan Faktor Daya." *JET (Journal of Electrical Technology)* 2, no. 3 (2017): 31-34.
- [13] Melipurbowo, Bambang Ghiri. "Pengukuran Daya Listrik Real Time Dengan Menggunakan Sensor Arus ACS. 712." *Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa dan Sosial* 12, no. 1 (2016).
- [14] Pramana, Putu Agus Aditya, Aristo Adi Kusuma, and Buyung Sofiaro Munir. "Inrush current investigation of capacitor bank switching for 150kV electrical system in Indonesia." In 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), pp. 259-263. IEEE, 2017.
- [15] Smeets, R. P. P., R. Wiggers, H. Bannink, S. Kuivenhoven, S. Chakraborty, and G. Sandolache. "The impact of switching capacitor banks with very high inrush current on switchgear." In 44th CIGRE conference, August 26-31, 2012, Paris, France, pp. A3-201. 2012.