

Optimasi Penentuan Lokasi Switched 20 KV Power Capacitors pada Jaringan Distribusi 20 KV Jawa Timur

Emmy Hosea, Adi Nugraha

Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra
e-mail : emmyho@peter.petra.ac.id; adicyber@mitra.net.id

Abstrak

Sejak tahun 1993, PLN Jawa Timur merasa perlu untuk memasang kapasitor di jaringan distribusi tegangan menengah karena rendahnya faktor daya dan tegangan di sepanjang jaringan. Diharapkan dengan dipasangnya kapasitor daya untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan, maka rugi-rugi sepanjang jaringan tegangan menengah akan berkurang. Dalam makalah ini akan disampaikan tentang penggunaan kapasitor daya 20 kV pada jaringan distribusi tegangan menengah dan optimasi penentuan lokasi kapasitor pada jaringan distribusi 20 kV PLN Jawa Timur. Dari hasil optimasi penentuan lokasi kapasitor pada studi kasus penyulang Jatirogo diperoleh hasil pemasangan yang paling baik adalah pada tiang 672 dengan menggunakan kapasitor 900 kVar dimana diperoleh $\cos\phi = 0.9979$ dan kenaikan tegangan sebesar 4,141 %

Kata kunci : 20 kV Kapasitor Tenaga, Optimasi, Jaringan Distribusi Tegangan Menengah

Abstract

Since 1993, PLN Jawa Timur found that it is necessary to apply power capacitors in the primary distribution feeders because the power factor and voltage along the main distribution line remain low. It is expected that with the application of power capacitors to fix power factor and voltage, then energy losses along the primary distribution feeders could be reduced. This paper will analyze and study about the implementation and usage of 20 KV power capacitors on the primary distribution feeders, and also optimize the correct placement of power capacitors on 20 KV primary distribution feeder belongs to PLN Jawa Timur. From the optimization process to correctly place the power capacitors on case study Jatirogo feeders it was found that the most efficient and effective place to attach the power capacitors is on T - 672 using 900 kVAR power capacitors which attain $\cos\phi = 0.9979$ and voltage rise up to 4,141 %.

Keywords : 20 KV Power Capacitors, Optimization, Primary Distribution Feeders

Pendahuluan

Di Indonesia, tenaga listrik dibangkitkan di pusat-pusat pembangkit tenaga listrik, seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTD yang kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (step up transformer) yang ada di pusat listrik. Saluran transmisi tegangan tinggi di PLN mempunyai tegangan 150 kV dan 500 kV. Selanjutnya tegangan tersebut diturunkan menjadi tegangan menengah sebesar 20 kV di Gardu Induk dengan menggunakan transformator penurun tegangan (step down transformer). Dan setelah melalui jaringan distribusi, tegangan diturunkan lagi pada Gardu-gardu Distribusi menjadi tegangan rendah

sebesar 380/220 Volt untuk selanjutnya disalurkan ke pelanggan-pelanggan PLN.

Beban-beban pada pelanggan-pelanggan utama dari sistem jaringan tegangan menengah merupakan beban industri-industri besar seperti industri tekstil, otomotif, penggilingan, perikanan, semen dan lain-lain yang pada umumnya mempunyai beban yang bersifat induktif sehingga faktor daya pada sistem jaringan distribusi menjadi rendah.

Hal lain yang penting adalah kualitas dan keandalan penyaluran tegangan. Namun adalah suatu hal yang sulit untuk mempertahankan tegangan konstan pada sistem distribusi karena drop tegangan akan terjadi pada hampir semua bagian sistem dan akan berubah sesuai dengan adanya perubahan beban.

Ada berbagai cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi drop tegangan dan memperbaiki

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Januari 2002. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 2 nomor 1 Maret 2002

faktor daya. Salah satu diantaranya adalah dengan pemasangan kapasitor daya di dalam jaringan sebagai pengatur tegangan dan perbaikan faktor daya.[1,6,7]

Penggunaan kapasitor daya sebagai pengatur tegangan dan perbaikan faktor daya telah cukup lama dikenal dalam sistem distribusi tenaga listrik. Namun, kapasitor daya umumnya dipasang di sisi beban, yakni oleh konsumen yang bersangkutan. Sejak tahun 1993, PLN merasa perlu untuk memasang kapasitor di SUTM, karena rendahnya faktor daya dan tegangan di sepanjang jaringan. Diharapkan, dengan dipasangnya kapasitor daya untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan, maka rugi-rugi sepanjang jaringan tegangan menengah akan berkurang.[6,7,8]

Satu permasalahan penting yang timbul, yakni ketepatan lokasi dan kapasitas dari kapasitor daya pada suatu titik percabangan tertentu, yang hingga saat ini dilakukan oleh PLN hanya dengan menggunakan perhitungan manual dan asumsi dasar yang berlaku umum. Hal ini mengakibatkan kapasitor daya yang dipasang pada jaringan distribusi tersebut tidak dapat berfungsi optimal, karena seringkali terjadi kesalahan dalam pengukuran data-data jaringan, serta kesalahan perhitungan yang dilakukan secara manual.

Untuk mengoptimalkan penempatan kapasitor sebagai pengatur tegangan ini pada jaringan distribusi, diperlukan penentuan lokasi kapasitor baru yang akan dipasang pada jaringan distribusi, maupun optimasi penggunaan kapasitor dengan merelokasi penempatan kapasitor lama agar lebih efektif dan efisien. Dengan menggunakan data-data yang diperoleh pada jaringan distribusi dan bantuan program optimasi akan dapat diketahui penempatan kapasitor yang paling tepat.

Dasar Pengaturan Tegangan

Meskipun telah ditetapkan didalam PUIL 1987 bahwa drop tegangan yang dapat ditoleransi pada saluran distribusi adalah sebesar 5%, pada kenyataannya nilai tersebut amat sulit untuk diwujudkan. Hal ini karena drop tegangan terjadi di semua bagian sistem dan akan berubah dengan adanya perubahan beban. Hal ini akan merugikan baik PLN maupun konsumen. Untuk itulah, penggunaan kapasitor sebagai pengatur

tegangan sistem dapat dilakukan dengan mengurangi drop tegangan dan rugi-rugi di jaringan tanpa menggunakan AVR (*Automatic Voltage Regulator*) yang secara ekonomis instalasi dan pemeliharaannya lebih mahal.

1. Drop Tegangan [1]

Harga pengaturan tegangan untuk tiap – tiap beban dengan bermacam – macam faktor daya dapat diperoleh dengan menggunakan rumus drop tegangan seperti di bawah ini :

$$\% \text{ Drop Tegangan} = \frac{(V_S - V_R)}{V_R} \times 100\%$$

di mana V_S = tegangan ujung kirim dan V_R = tegangan ujung terima, maka :

$$\% \text{ Volt Drop} = \frac{S_1 \cdot d \cdot (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi)}{10 \text{ (kV)}^2}$$

di mana

- S_1 = daya semu sebelum dipasang kapasitor
- X = reaktansi saluran dalam ohm per kilometer
- R = resistansi saluran dalam ohm per kilometer
- d = panjang konduktor dalam kilometer
- kV = tegangan antar fasa
- ϕ = sudut dari faktor daya

Harga di atas berlaku untuk drop tegangan pada sistem tiga fasa.

2. Perbaikan Tingkat Tegangan[1]

Pemasangan kapasitor pada saluran distribusi akan mengurangi drop tegangan disepanjang saluran. Jatuh tegangan setelah dipasang kapasitor pada ujung penerima dari saluran untuk tiap bagian, secara pendekatan dapat dihitung :

$$\begin{aligned} \Delta V' &= I_r \cdot R + I_x \cdot X - I_c \cdot X \\ \Delta V' &= I_r \cdot R + (I_x - I_c) X \end{aligned} \quad (1)$$

di mana I_c = komponen arus reaktif kapasitif (90° leading) sehingga dari rumus (1) di atas akan diperoleh persentase kenaikan tegangan yang disebabkan oleh arus kapasitor yang bersifat reaktif kapasitif adalah sebesar :

$$\Delta V_c = I_c \cdot X \quad (2)$$

di mana ΔV_C = kenaikan tegangan yang disebabkan oleh arus kapasitor

Selanjutnya, prosentase kenaikan tegangan pada seluruh bagian sistem distribusi dapat diperhitungkan sebagai berikut :[2]

$$\% \text{ Volt Rise} = \frac{(CkVA) \times (X) \times (d)}{10 (kV)^2} \dots\dots (3)$$

di mana

- kVAR= jumlah kVAR untuk sistem 3 fasa yang diperlukan
- X = reaktansi saluran dalam ohm per kilometer
- d = panjang konduktor dalam kilometer
- kV = tegangan antar fasa

Kapasitor dengan Switching Otomatis

1. Kapasitor Paralel [2,3]

Penggunaan kapasitor seri cenderung dipasang pada sisi beban, terutama pada industri – industri yang besar dengan penambahan beban yang signifikan seiring dengan peningkatan produksi, dalam bentuk kapasitor bank. Namun, penggunaan kapasitor paralel dalam sistem tegangan menengah sebenarnya lebih diperuntukkan pada perbaikan kualitas sepanjang jaringan SUTM. Adapun bentuk-bentuk manfaat yang diperoleh diantaranya adalah :

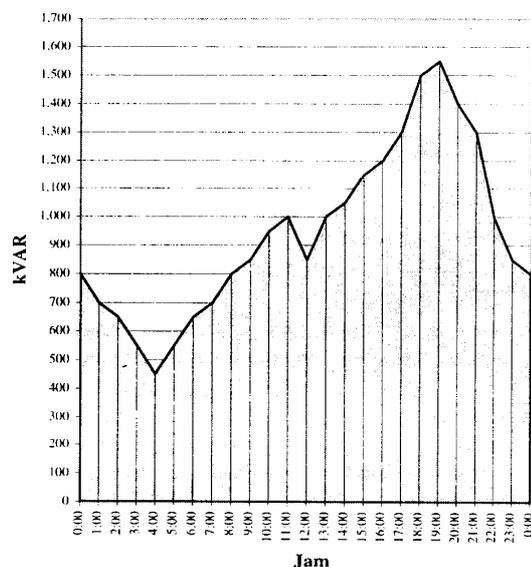
1. Berkurangnya drop tegangan disepanjang saluran.
2. Berkurangnya kebutuhan kVA dari catu daya.
3. Perbaikan faktor daya disepanjang saluran.

Kapasitor paralel dalam sistem tegangan menengah disusun dalam hubungan berbagai bentuk seperti bintang ditanahkan, bintang yang tidak ditanahkan, delta dan sebagainya sesuai dengan kebutuhannya. Rangkaian kapasitor daya yang dihubungkan secara delta dapat dipakai sampai 6,6 kV, untuk tegangan yang lebih dari itu dipakai sambungan bintang. Untuk rangkaian kapasitor daya sambungan bintang pada umumnya netral kapasitor hanya ditanahkan bila sistem distribusi atau transformator substasion ditanahkan pula.

2. Perbaikan Faktor Daya dengan Menggunakan Switched Kapasitor

Untuk suatu sistem tegangan menengah mempunyai beban yang relatif konstan selama 24 jam dengan faktor daya yang juga relatif tetap, maka perbaikan faktor daya tersebut dapat dilakukan dengan cara memasang sejumlah kapasitor daya tetap (*fixed capacitor*) dengan kapasitas tertentu yang berdasarkan pada besarnya daya reaktif induktif sistem tersebut.

Lain halnya jika sistem tersebut mempunyai beban yang besarnya bervariasi. Jika kita mengkompensasi beban induktif pada sistem tersebut dengan memasang kapasitor daya tetap di atas, maka pada saat beban puncak kapasitor tersebut akan membangkitkan daya reaktif kapasitif (kVAR yang leading) dengan harga yang maksimum. Sehingga pada saat-saat tertentu dimana besarnya beban induktif berada pada titik yang terendah, maka akan terjadi kelebihan daya reaktif kapasitif yang dihasilkan oleh kapasitor daya tetap tersebut sehingga faktor daya pada sistem menjadi leading.



Gambar 1. Contoh Kurva Beban Reaktif Harian Suatu Sistem Tegangan Menengah[1]

Gambar 1 ini menggambarkan sebuah contoh kurva beban reaktif induktif harian pada suatu sistem tegangan menengah dengan beban yang besarnya bervariasi. Jadi untuk kondisi beban reaktif induktif harian seperti pada gambar di atas, kapasitas kapasitor daya yang akan

dipasang pada sistem harus diperhitungkan dan diatur sedemikian rupa sehingga pada saat kapasitor tersebut terhubung dengan sistem, kondisi sistem tidak menjadi kapasitif karena kelebihan daya reaktif kapasitif yang dihasilkan oleh kapasitor. Oleh karena itu diperlukan suatu alat penghubung dan pemutus pada rangkaian kapasitor tersebut. Hal ini dimaksudkan agar kapasitor itu dapat terhubung dengan sistem pada saat-saat tertentu sesuai dengan besarnya kVAR yang dibutuhkan dan terlepas dari sistem jika kapasitor tersebut tidak dibutuhkan lagi oleh sistem. Kapasitor daya yang bekerja dengan cara tersebut sering disebut sebagai kapasitor variabel atau switching kapasitor.

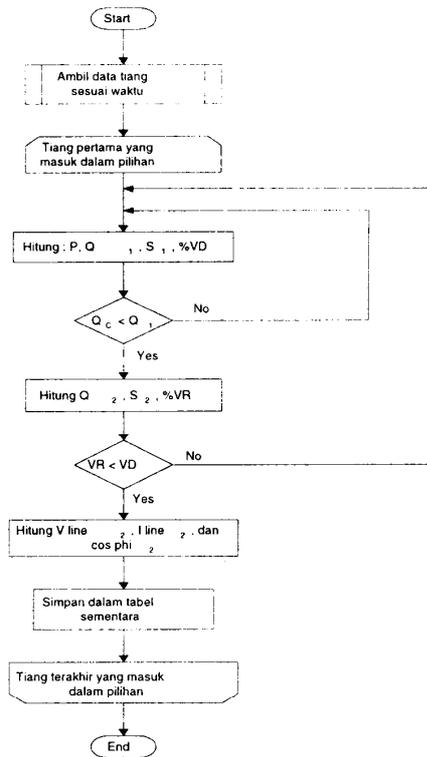
Optimasi Penentuan Lokasi Kapasitor Daya 20 KV

Seperti telah dikemukakan pada bagian sebelumnya, penggunaan kapasitor daya pada sistem distribusi tegangan menengah adalah untuk perbaikan tegangan, perbaikan faktor daya, dan mengurangi rugi-rugi daya di sepanjang jaringan. Metode yang selama ini digunakan yaitu perhitungan secara manual, seringkali tidak efisien dan malah mengakibatkan seringkali kapasitor yang ada tidak dapat dioperasikan. Hal ini antara lain disebabkan oleh[4,5] :

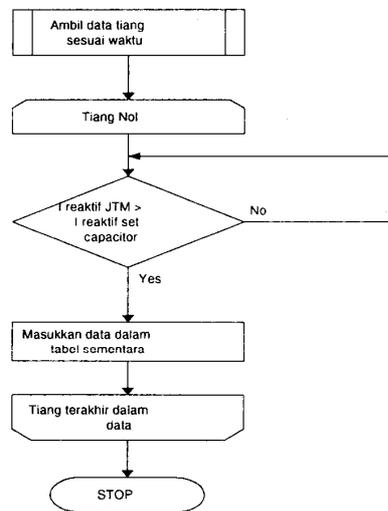
1. Peralatan kontrol otomatis yang ada rusak. Sebabnya dapat mulai dari karena tidak dilindungi dari gangguan cuaca, short-circuit, dan sebagainya.
2. Kapasitor men-supply daya reaktif yang berlebihan, sehingga akibatnya faktor daya ($\cos\phi$) menjadi leading, atau kenaikan tegangan yang berlebihan, sehingga berakibat pada terjadinya trip tegangan di gardu induk.

Hal-hal semacam ini tentu saja tidak perlu terjadi bilamana penempatan lokasi kapasitor telah dilakukan secara tepat. Oleh karena itu proses optimasi mutlak memerlukan bantuan pemrograman komputer, dalam hal ini digunakan bahasa pemrograman Borland Delphi 5.0.

Adapun diagram alir pemrograman ditunjukkan pada gambar 2a. Sedangkan diagram alir prosedur pemilihan tiang ditunjukkan pada gambar 2b.



Gambar 2a. Diagram Alir Utama Pemrograman

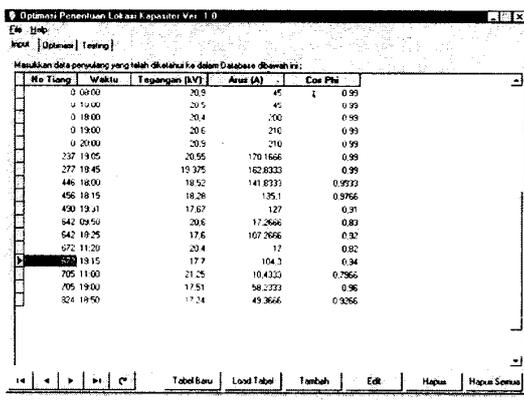


Gambar 2b. Diagram Alir Prosedur Pemilihan Tiang

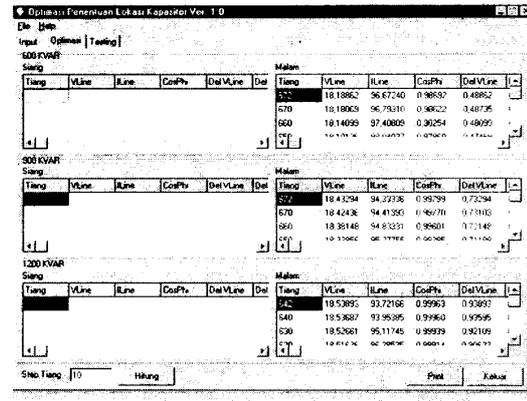
Penjelasan Singkat Tampilan Program

Pada bagian ini akan diuraikan secara singkat mengenai tampilan program dan menu – menu utamanya. Ada tiga macam submenu yang ditampilkan, yakni :

1. Input, yakni proses pencatatan data jaringan yang diinputkan ke dalam suatu database dimana data yang diinputkan merupakan data jaringan dari hasil survei lapangan, yang meliputi Nomor Tiang, Waktu pengukuran, Tegangan (kV), Arus (A), dan faktor daya (cos phi). Data yang ada akan digunakan sebagai basis dalam melakukan proses interpolasi dan iterasi, untuk menentukan nilai tegangan, arus dan faktor daya pada tiang– tiang lain yang tidak diketahui nilainya.
2. Optimasi, yakni submenu tampilan dan perhitungan lokasi yang memiliki optimasi peletakan kapasitor tertinggi. Diurutkan berdasarkan Delta V line tertinggi. Pada submenu ini, dikelompokkan menjadi 3 bagian, yakni optimasi untuk kapasitor 600, 900, dan 1200 kVAR. Pengelompokan ini didasarkan pada segi ekonomis, karena pemasangan kapasitor kurang dari 600 kVAR dan lebih besar dari 1200 kVAR tidak efisien.
Pembagian waktu antara siang dan malam, didasarkan pada kebutuhan waktu penggunaan, yakni Waktu Siang antara pukul 6.00 – 18.00 dan Waktu Malam antara pukul 18.00 – 06.00 pagi.

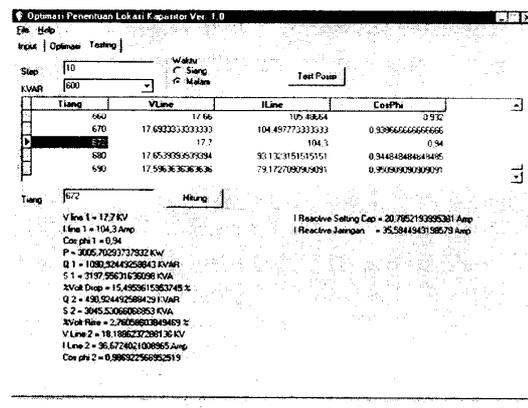


Gambar 3. Submenu Input dari Program Optimasi Penentuan Lokasi Kapasitor



Gambar 4. Submenu Optimasi dari Program Optimasi Penentuan Lokasi Kapasitor

3. Submenu yang terakhir adalah Testing. Bagian ini dibuat untuk menguji coba program yang telah dibuat, dengan memperhitungkan data yang telah diinput dan dihitung nilai keluarannya. Testing dilakukan per step tiang yang ditentukan sendiri oleh pemakai. Disamping itu kVAR yang distandarkan adalah 600 kVAR, 900 kVAR, dan 1200 kVAR. Walaupun demikian, perhitungan dapat dilakukan pula untuk kVAR yang lebih rendah maupun lebih tinggi. Hasil yang diperoleh dari testing ini adalah diketahuinya nilai-nilai dari tegangan, arus, faktor daya, daya aktif, daya reaktif dan daya semu pada saat sebelum dipasang kapasitor, drop tegangan pada saat sebelum dipasang kapasitor serta kenaikan tegangan setelah dipasangnya kapasitor.



Gambar 5. Submenu Testing dari Optimasi Penentuan Lokasi Kapasitor ver 1.0

Pengujian Optimasi di Feeder Jatirogo pada Gardu Induk Mliwang

Penyulang Jatirogo terbentang sepanjang 70 km dari pangkal Gardu Induk Mliwang, Kabupaten Bojonegoro hingga ujung penyulang yang terletak di Desa Medalem. 30 km diantaranya penyulang terletak pada jalur Pantai Utara Jawa (Pantura), dimana berbagai macam industri skala kecil dan menengah berkembang pesat. Jenis industri perikanan meliputi peternakan air payau, industri pengolahan garam, pengawetan ikan laut, dan sebagainya. Sementara itu, 40 km panjang penyulang sisanya adalah perumahan pedesaan dan industri mebel kehutanan. Perbedaan peruntukan penggunaan tenaga listrik ini mengakibatkan munculnya karakteristik khusus pada titik pusat beban.

Karakteristik khusus yang dimaksud adalah bilamana pada siang hari, fitur tegangan relatif baik (19 – 20 kV) dan arusnya relatif rendah (< 50 A), namun faktor daya juga rendah (< 0,82). Sedangkan pada malam hari, tegangan relatif rendah (< 18,5 kV) dan arusnya relatif tinggi (> 50 A), namun faktor dayanya tinggi (> 0,85).

Pemilihan penyulang Jatirogo didasarkan pada karakteristik penyulang ini yang cukup lengkap permasalahannya dan dapat mewakili permasalahan yang timbul pada penyulang-penyulang lain di Jawa Timur. Dalam penulisan ini perencanaan penentuan lokasi optimum kapasitor diasumsikan tidak adanya penambahan beban yang signifikan dan tidak adanya perluasan jaringan SUTM.

Adapun hasil dari proses perhitungan optimasi adalah sebagai berikut :

1. Pada pemasangan kapasitor daya 600 kVAR pada malam hari

V line ₁	= 17,7 kV
I line ₁	= 104,3 Amp
Cos φ 1	= 0,94
I reaktif set cap (I _R)	= 20,78521 Amp
I reaktif JTM (I _X)	= 35,5845 Amp
Daya aktif (P)	= 3005,7029 kWatt
Daya reaktif (Q ₁)	= 1090,9245 kVAR
Daya semu (S ₁)	= 3197,5563 kVA
% Volt Drop	= 15,49596 %
Q ₂	= 490,9245 kVAR
S ₂	= 3045,5307 kVA
% Volt Rise	= 2,7606 %

V line ₂	= 18,1886 kVolt
I line ₂	= 96,6724 Amp
Cos φ 2	= 0,9869

2. Pada pemasangan kapasitor daya 900 kVAR pada malam hari

V line ₁	= 17,7 kV
I line ₁	= 104,3 Amp
Cos φ 1	= 0,94
I reaktif set cap (I _R)	= 31,1778 Amp
I reaktif JTM (I _X)	= 35,5845 Amp
Daya aktif (P)	= 3005,7029 kWatt
Daya reaktif (Q ₁)	= 1090,9245 kVAR
Daya semu (S ₁)	= 3197,5563 kVA
% Volt Drop	= 15,49596 %
Q ₂	= 190,9245 kVAR
S ₂	= 3011,7607 kVA
% Volt Rise	= 4,1409 %
V line ₂	= 18,4329 kVolt
I line ₂	= 94,3333 Amp
Cos φ 2	= 0,9979

Analisa Hasil Optimasi

Dari proses optimasi yang telah dilaksanakan diperoleh hasil sebagai berikut untuk Penyulang Jatirogo pada Gardu Induk Mliwang :

1. Kapasitor Daya 600 kVAR, 900 kVAR dan 1200 kVAR → Siang Hari
Tidak ada lokasi yang memenuhi syarat untuk dipasang kapasitor. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, yakni :
 - a. Tegangan dan Arus relatif baik. Walaupun faktor daya kurang baik, namun kVAR yang perlu dikompensasi ke jaringan tidak mencapai 600 kVAR.
 - b. I reaktif jaringan lebih kecil daripada I reaktif setting kapasitor.
2. Kapasitor Daya 600 kVAR → Malam Hari
Pada malam hari, diperoleh hasil lebih dari 10 lokasi tiang yang dapat dipasang kapasitor berdasarkan selisih perbaikan tegangan dan selisih perbaikan faktor daya yang dihasilkan.

Tabel 1 menunjukkan data 12 posisi tiang terbaik untuk penempatan kapasitor daya pada malam hari. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa Tiang 690 menghasilkan perbaikan tegangan paling tinggi, sedangkan Tiang 642 menghasilkan perbaikan faktor

daya paling tinggi. Untuk menentukan tempat pemasangan kapasitor diserahkan sepenuhnya ke pemakai, apakah kapasitor tersebut lebih dititikberatkan penggunaannya pada perbaikan tegangan, ataukah pada perbaikan faktor daya.

Tabel 1. Dua belas posisi tiang terbaik untuk Penempatan Kapasitor Daya 600 kVAR malam hari

No. Tiang	V line ₂ (kV)	I line ₂ (A)	Cos ϕ_2	ΔV line (kV)	$\Delta \cos \phi$
690	18,04805	73,243	0,9983	0,5062	0,0459
680	18,06133	86,067	0,9936	0,4983	0,0462
672	18,07196	96,421	0,9888	0,4919	0,0455
670	18,07179	96,555	0,9880	0,4904	0,0462
660	18,07095	97,247	0,9838	0,4829	0,0498
650	18,07012	97,965	0,9792	0,4754	0,0529
642	18,06946	98,557	0,9752	0,4694	0,0552
640	18,0689	98,808	0,9751	0,4679	0,0552
630	18,06607	100,06	0,9742	0,4605	0,0549
620	18,06325	101,32	0,9732	0,4531	0,0547
610	18,06043	102,58	0,9723	0,4456	0,0544
600	18,05761	103,84	0,9714	0,4382	0,0542

3. Kapasitor Daya 900 kVAR → Malam Hari
Pada malam hari, 10 lokasi tiang yang dapat dipasang kapasitor berdasarkan selisih perbaikan tegangan dan selisih perbaikan faktor daya yang dihasilkan. Diantaranya adalah :

Tabel 2. Dua Belas Posisi Terbaik untuk Penempatan Kapasitor Daya 900 kVAR malam hari

No. Tiang	V line ₂ (kV)	I line ₂ (A)	Cos ϕ_2	ΔV line (kV)	$\Delta \cos \phi$
672	18,3179	94,1821	0,9987	0,73794	0,0554
670	18,3170	94,2687	0,9984	0,73569	0,0566
660	18,3124	94,7281	0,9966	0,72443	0,0626
650	18,3078	95,2261	0,9943	0,71318	0,0680
642	18,3041	95,6488	0,9920	0,70419	0,0720
640	18,3028	95,8916	0,9919	0,70196	0,0720
630	18,2963	97,1074	0,9912	0,69081	0,0720
620	18,2898	98,3262	0,9905	0,67967	0,0719
610	18,2832	99,5478	0,9898	0,66853	0,0719
600	18,2767	100,775	0,9890	0,6574	0,0718
590	18,2702	101,999	0,9883	0,64628	0,0717
580	18,2637	103,229	0,9875	0,63516	0,0716

Dari data di atas dapat diketahui bahwa Tiang 672 menghasilkan perbaikan tegangan paling tinggi, sedangkan Tiang 642 dan Tiang 640 menghasilkan perbaikan faktor daya paling tinggi. Untuk menentukan tempat pemasangan kapasitor diserahkan sepenuhnya ke pemakai, apakah kapasitor tersebut lebih dititikberatkan penggunaannya pada perbaikan tegangan, ataukah pada perbaikan faktor daya.

Bila dibandingkan dengan pemasangan kapasitor daya 600 kVAR, maka perbaikan tegangan dan perbaikan faktor daya yang dihasilkan, pada titik tertentu memiliki kualitas yang lebih baik. Hal ini dimungkinkan karena pada titik tersebut, seluruh syarat pemasangan kapasitor dapat dipenuhi.

4. Kapasitor Daya 1200 kVAR → Malam Hari
Pada malam hari, lebih dari 15 lokasi tiang yang dapat dipasang kapasitor berdasarkan selisih perbaikan tegangan dan selisih perbaikan faktor daya yang dihasilkan tersebut diantaranya adalah:

Tabel 3. Delapanbelas Posisi Terbaik untuk Penempatan Kapasitor Daya 1200 kVAR Malam Hari

No. Tiang	V line ₂ (kV)	I line ₂ (A)	Cos ϕ_2	ΔV line (kV)	$\Delta \cos \phi$
642	18,53893	93,72166	0,99963	0,938	0,0796
640	18,53687	93,95385	0,9996	0,935	0,0797
630	18,52661	95,11745	0,99939	0,921	0,0801
620	18,51636	96,28535	0,99914	0,906	0,0805
610	18,50612	97,45748	0,99886	0,891	0,0809
600	18,49588	98,63379	0,99855	0,876	0,0813
590	18,48565	99,8142	0,9982	0,861	0,0816
580	18,47543	100,9986	0,99782	0,846	0,0819
570	18,46522	102,1871	0,99742	0,832	0,0821
560	18,45501	103,3794	0,99698	0,817	0,0823
550	18,44481	104,5757	0,99652	0,802	0,0825
540	18,43462	105,7758	0,99604	0,787	0,0827
530	18,42444	106,9797	0,99553	0,772	0,0829
520	18,41426	108,1873	0,995	0,758	0,0830
510	18,4041	109,3986	0,99446	0,743	0,0831
500	18,39394	110,6135	0,99389	0,728	0,0832
490	18,38379	111,8321	0,9933	0,713	0,0833
480	18,5416	116,0971	0,99729	0,692	0,0677

Dari data di atas dapat diketahui bahwa Tiang 642 menghasilkan perbaikan tegangan paling tinggi, sedangkan Tiang 490 menghasilkan perbaikan faktor daya paling tinggi. Untuk menentukan tempat pemasangan kapasitor diserahkan sepenuhnya ke pemakai, apakah kapasitor tersebut lebih dititikberatkan penggunaannya pada perbaikan tegangan, ataukah pada perbaikan faktor daya.

Namun, muncul fenomena bahwa nomor tiang yang dapat dipasang kapasitor semakin kecil. Hal ini terjadi karena pada tiang yang memiliki nomor besar (lebih dekat ke ujung penyulang), arus reaktifnya makin kecil. Sehingga, arus reaktif setting kapasitor menjadi lebih besar daripada arus reaktif jaringan. Untuk itulah, kapasitor yang kapasitasnya semakin besar hanya dapat

dipasang pada tiang yang bernomor relatif kecil atau tiang yang lebih dekat pada Gardu Induk.

Pada gilirannya, hal ini akan menimbulkan efek pemasangan kapasitor bank pada Gardu Induk. Bila hal demikian terjadi, maka tujuan awal untuk menaikkan tegangan, mengurangi rugi – rugi dan meningkatkan faktor daya di sepanjang jaringan tidak dapat tercapai. Lagipula, pemasangan kapasitor bank di Gardu Induk biayanya jauh lebih besar daripada pemasangan kapasitor bertipe pole – mounted pada jaringan tegangan menengah.

Kesimpulan

Dari uraian pembahasan dan analisa yang telah dilakukan pada bab – bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Faktor daya yang rendah dari suatu sistem tegangan menengah yang disebabkan karena pemakaian beban-beban induktif pada sistem dapat diperbaiki dengan memasang kapasitor daya pada sistem distribusi tegangan menengah tersebut.
2. Perbaikan faktor daya pada sistem tegangan menengah akan menyebabkan berkurangnya pasok kVA sumber dan kVAR pada sistem tersebut. Sehingga bagi PLN sebagai pemasok daya listrik, hal tersebut merupakan peningkatan efisiensi dan pelayanan terhadap pelanggan, yaitu dalam hal peningkatan mutu daya yang disalurkan.
3. Pada sistem tegangan menengah dengan variasi beban yang besar, perbaikan faktor daya sangat efektif bila menggunakan kapasitor switched yang dapat dikontrol secara otomatis, sehingga variasi daya reaktif pada sistem tersebut dapat dikompensasi dengan mudah.
4. Proses optimasi dilakukan dengan menggunakan interpolasi untuk menentukan tegangan, arus dan faktor daya diantara dua tiang yang telah diketahui nilainya. Semakin banyak data yang diketahui semakin baik pula hasilnya.
5. Dari hasil optimasi penentuan lokasi kapasitor pada studi kasus penyulang Jatirogo diperoleh hasil pemasangan yang paling baik adalah pada tiang 672 dengan menggunakan kapasitor 900 kVAR dimana diperoleh $\cos \phi = 0,9979$ dan kenaikan tegangan sebesar 4,141 %.

Daftar Pustaka

- [1]. Burke, James J. Power Distribution Engineering: Fundamentals and Applications, New York: Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [2]. Fawzi, Tharwat H., et al. New Approach For The Application Of Shunt Capacitors To The Primary Distribution Feeders, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 1, January 1983, pp. 10 – 13.
- [3]. Grainger, J. J. and S.H. Lee. Optimum Size and Location Of Shunt Capacitors For Reduction of Losses On Distribution Feeders, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS – 100, No. 3, March 1981, pp.1105 – 1118.
- [4]. Kaplan, M. Optimization of Number, Location, Size, Control Type and Control Setting Of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.9, September 1984, pp. 2659 – 2665.
- [5]. Lee, S. H. And J.J. Grainger. Optimum Placement Of Fixed and Switched Capacitors On Primary Distribution Feeders, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.1, January 1981, pp.345–352.
- [6]. Longland, T., et al., Power Capacitor Handbook, 1st edition, London : Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1984.
- [7]. Miller, Timothy J. E., Reactive Power Control in Electric Systems, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1982.
- [8]. Power Capacitors Reference Data, Electrical Apparatus, R 230 – XX , Waukesha: Cooper Power Systems, Inc. 1991.