

OPTIMAL CAPACITOR PLACEMENT (OCP) PADA SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV MENGGUNAKAN ETAP

Baktiyar Freda Risjayanto

Progam Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : baktiyarfreda66@gmail.com

Tri Wrahatnolo

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : triwrahatnolo@unesa.ac.id.

Abstrak

Faktor daya adalah sudut yang terbentuk karena adanya perbedaan fasa antara arus dan tegangan, atau dapat juga diartikan sebagai rasio perbandingan antara daya nyata dengan daya total. Nilai faktor daya pada suatu sistem dipengaruhi besarnya beban listrik yang bersifat induktif, karena membutuhkan daya reaktif yang besar dalam sistem kerjanya. Apabila suatu sistem memiliki beban reaktif yang dominan, maka sistem tersebut harus memiliki kompensator daya reaktif sendiri. Jika tidak, maka daya reaktif akan sepenuhnya disuplai oleh pusat pembangkit listrik, sehingga mengalir daya reaktif pada saluran yang mengakibatkan menurunnya kondisi faktor daya, nilai tegangan dan naiknya kondisi arus pada saluran serta mengakibatkan rugi-rugi daya yang besar pada saluran.

Pada penelitian ini dibahas studi kasus perbaikan kondisi faktor daya di subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan yang memiliki kondisi faktor daya rendah dibawah standar PLN yaitu 0.85. Perbaikan faktor daya dilakukan dengan metode *optimal capacitor placement* (OCP). Dengan melakukan OCP pada jaringan diharapkan dapat memperbaiki kondisi faktor daya, nilai tegangan, mereduksi nilai arus pada saluran dan mereduksi rugi-rugi daya pada saluran.

Dari hasil penelitian, diketahui letak pemasangan tambahan kapasitor sebagai kompensator daya reaktif di 2 lokasi berbeda pada subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan yaitu di bus 28 dan bus 55 dengan nilai total mencapai 790 kVAr. Setelah dilakukan OCP, terjadi perbaikan nilai faktor daya sebesar 4.46549% (0.0385833), reduksi nilai arus pada saluran sebesar 5.72842% (3.19722 A), perbaikan nilai tegangan sebesar 0.04724% (0.00941 kV) dan terjadi reduksi rugi-rugi daya pada saluran sebesar 11.25449% (0.06202 kW).

Kata Kunci: Faktor daya, kompensasi daya reaktif, *optimal capacitor placement* (OCP).

Abstract

Power factor is the angle formed because of difference in phase between current and voltage, or it can also be interpreted of the ratio between real power and total power. The value of power factor in a system is influenced by the magnitude of the inductive electrical load, because it requires a large reactive power in its working system. If a system has a dominant reactive load, the system must have its own reactive power compensator. If not, then the reaktif power will be fully supplied by the power plant, thus flowing reactive power to the channel resulting in decreasing power factor conditions, voltage values and rising current conditions on the line and causing large power losses in the line.

In this research a study case of the improvement of power factor conditions in the distribution network subsystem 20 kV of Bandilan feeder which has a low power factor condition below the PLN standard is 0.85. Power factor improvement is done by the optimal capacitor placement (OCP) method. Doing OCP on the network is expected to improve power factor conditions, voltage values, reduce the current value in the line and reduce power losses in the line.

From the result of the research, it is known that the location of additional capacitor as reactive power compensator in 2 different locations in the distribution network subsystem of 20 kV Bandilan repeater that is on bus 28 and bus 55 with total value reaching 790 kVAr. After OCP, there was an improvement of power factor value of 4.46549% (0.0385833), reduction of current value on line 5.72842% (3.19722 A), improvement of voltage value 0.04724% (0.00941 kV) and reduction of power losses on line 11.25449 % (0.06202 kW).

Keywords: Power factor, reactive power compensation, optimal capacitor placement (OCP).

PENDAHULUAN

Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan beban. Sistem distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke pusat beban. Sistem ini terdiri dari jaringan tegangan

menengah (20 kV) dan tegangan rendah (220/380 V). Kualitas penyaluran daya listrik pada sistem jaringan distribusi dipengaruhi oleh spesifikasi saluran dan karakteristik beban. Beban listrik pada setiap tahunnya mengalami peningkatan. Peningkatan beban diiringi dengan meningkatnya permintaan suplai daya listrik. Dalam hal ini beban induktif menjadi perhatian, karena

beban induktif membutuhkan daya reaktif dalam proses kerjanya. Bertambahnya beban pada sistem distribusi yang bersifat induktif mengakibatkan peningkatan permintaan suplai daya reaktif. Daya reaktif paling banyak dikonsumsi oleh peralatan listrik seperti transformator dan motor listrik.

Apabila suatu sistem jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban, maka kebutuhan daya reaktif beban sepenuhnya diproduksi oleh generator. Sehingga mengalir arus reaktif pada jaringan yang mengakibatkan menurunnya kondisi faktor daya, menurunnya nilai tegangan pada ujung jaringan dan memperbesar nilai arus pada saluran serta mengakibatkan rugi-rugi daya yang besar pada saluran.

Untuk menjaga kebutuhan suplai daya reaktif beban pada sistem dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan menambah arus eksitasi pada generator pembangkit dan pemasangan kapasitor *shunt* pada daerah beban (Marsudi, 2006). Dari dua cara tersebut, pemasangan kapasitor *shunt* adalah cara yang paling efisien. Pemasangan kapasitor *shunt* juga terbilang mudah dilakukan dan memiliki ekonomis yang rendah. (Saini dkk, 2016)

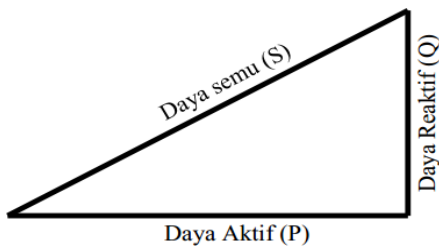
Optimal capacitor placement (OCP) merupakan penyelesaian untuk menentukan lokasi pemasangan yang optimal dan nilai kapasitor *shunt* yang akan dipasang pada sistem tenaga listrik. Fungsi objektif pada penempatan optimal kapasitor adalah untuk memperbaiki faktor daya, serta mereduksi *losses energy* dan memperbaiki kondisi tegangan sistem.

Pada penelitian ini dilakukan di subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan pada saat kondisi beban puncak. Berdasarkan hasil rekapitulasi pengukuran beban gardu distribusi tahun 2017 terdapat studi kasus faktor daya yang rendah dibawah standar PLN yaitu 0.85. Peneliti bermaksud untuk melakukan analisa perbaikan faktor daya dengan penambahan kapasitor *shunt* di lokasi yang optimal (OCP) dengan bantuan *software* ETAP 12.6.0.

KAJIAN TEORI

Daya Listrik AC (*Alternating Current*)

Daya listrik AC dibedakan menjadi tiga, yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q) dan daya semu (S). Hubungan dari ketiga daya tersebut dapat dinyatakan dalam segitiga daya seperti ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1 Segitiga daya. (Daryanto, 2014)

Dari hubungan segitiga daya pada Gambar 1 didapat persamaan sebagai berikut:

$$S = P + jQ \tag{1}$$

$$P = S \times \cos \theta \tag{2}$$

$$Q = S \times \sin \theta \tag{3}$$

Atau juga dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$S = V \times I \tag{4}$$

$$P = V \times I \times \cos \theta \tag{5}$$

$$Q = V \times I \times \sin \theta \tag{6}$$

Keterangan:

S = Daya semu atau daya total (VA)

P = Daya nyata atau daya aktif (Watt)

Q = Daya reaktif (VAr)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

cos θ = Faktor daya atau faktor beban

Faktor Daya

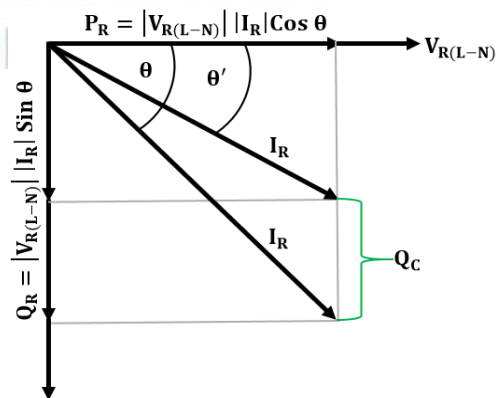
Menurut (Chopade dkk, 2011) faktor daya adalah rasio daya nyata (W) untuk daya total (VA). Faktor daya juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya aktif dan daya semu atau sudut yang terbentuk karena adanya perbedaan fasa antara arus dan tegangan (Whitaker, 1999). Faktor daya dipengaruhi oleh jenis beban terpasang pada sistem. Karakteristik beban dapat menentukan besarnya nilai faktor daya. Beban induktif memiliki pengaruh besar terhadap faktor daya karena beban induktif menyerap daya reaktif yang cukup besar, sehingga dapat menurunkan faktor daya. Faktor daya disimbolkan sebagai cos θ, dimana:

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \tag{7}$$

Koreksi Faktor Daya

Tujuan utama dari koreksi faktor daya adalah untuk meningkatkan faktor daya pada sistem. Faktor daya yang dikehendaki adalah 1 atau mendekati 1. Koreksi faktor daya dilakukan dengan mengontrol aliran daya reaktif sistem, yaitu dengan cara kompensasi daya reaktif.

Salah satu kompensator daya reaktif yang sering digunakan adalah kapasitor *shunt* dengan rating VAr. Kapasitor *shunt* dapat dipasang dekat dengan beban, sehingga suplai daya reaktif dapat dilakukan dengan maksimal dan dapat memperbaiki kondisi faktor daya. Berikut fasor perbaikan faktor daya dengan kapasitor *shunt* seperti ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2 Fasor perbaikan faktor daya dengan kapasitor *shunt*.

(Sumber: Hutauruk, 1985)

Dari Gambar 2 dapat dituliskan persamaan sebagai berikut.

Besar daya reaktif yang diperlukan untuk mencapai faktor daya target adalah:

$$Q_C = P_R (\tan \theta \text{ awal} - \tan \theta \text{ target}) \quad (8)$$

Bila I_C arus pada kapasitor *shunt* adalah:

$$|I_C| = \omega C |V_{R(L-N)}| \quad (9)$$

Jadi besarnya daya reaktif kapasitor adalah:

$$Q_C = |V_{R(L-N)}| |I_C| \quad (10)$$

$$= \omega C |V_{R(L-N)}|^2$$

Besarnya kapasitansi kapasitor per fasa adalah:

$$C = \frac{P_{R \text{ satu fasa}} (\tan \theta \text{ awal} - \tan \theta \text{ target})}{\omega |V_{R(L-N)}|^2} \quad (11)$$

Untuk tiga fasa, maka daya reaktif total dari kapasitor adalah:

$$Q \text{ 3 fasa } (3Q_C) = 3 \omega C |V_{R(L-N)}|^2 \quad (12)$$

Keterangan:

Q_C = Kompensasi daya reaktif (VAr)

P_R = Daya aktif beban (Watt)

I_C = Arus reaktif kapasitor (Ar)

C = Kapasitansi kapasitor (Farad)

$V_{R(L-N)}$ = Tegangan jaringan (V)

Optimal Capacitor Placement (OCP)

OCP merupakan penyelesaian untuk menentukan lokasi yang optimal dan nilai kapasitor *shunt* yang akan dipasang pada sistem tenaga listrik. Fungsi objektif pada penempatan optimal kapasitor adalah untuk memperbaiki faktor daya, serta mereduksi *losses energy* dan memperbaiki tegangan sistem (chopade dkk, 2011). Pada penelitian ini OCP dilakukan dengan bantuan *software* ETAP 12.6.0, sehingga dapat ditentukan lokasi yang terbaik dan ukuran besarnya kapasitor sebagai kompensasi daya reaktif.

Fungsi objektif OCP dari ETAP 12.6.0 secara matematika adalah sebagai berikut:

$$OF = \sum_{i=1}^{N_{bus}} X_i C_{0i} + Q_{ci} C_{1i} + B_i C_{2i} T + C_2 \sum_{l=1}^{N_{load}} T_l P_l^l \quad (13)$$

Keterangan:

N_{bus} : Nomor dari kandidat bus

N_{load} : Nomor beban

X_i : 0/1, 0 artinya tidak ada kapasitor yang terpasang pada bus i

C_{0i} : Biaya pemasangan

C_{1i} : Biaya Per kVAr dari kapasitor bank

Q_{ci} : Nilai kapasitor bank dalam kVAr

B_i : Nomor dari kapasitor bank

C_{2i} : Biaya operasi dari kapasitor per tahun

T : Rencana dalam tahun

C_2 : Biaya dari *losses* kWh, dalam \$/kWh

l : Level beban, maximum, rata-rata dan minimum

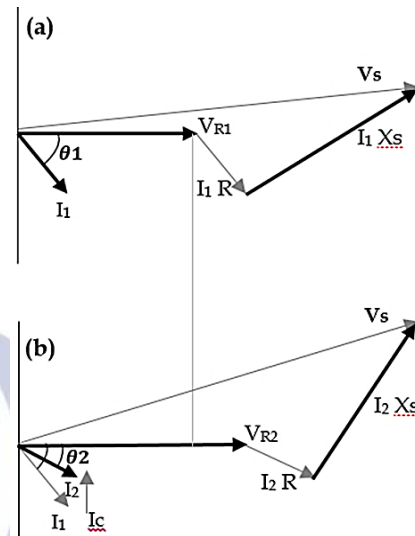
T_l : Durasi waktu, dalam jam, dari level beban l

P_l^l : *Losses* total dari sistem pada level beban l

Hubungan OCP Dengan Faktor Daya dan Tegangan Sistem

Bertambahnya beban induktif akan mengakibatkan peningkatan daya reaktif pada sistem, sehingga dapat mengakibatkan penurunan tegangan dan memperkecil faktor daya sistem. Penambahan kapasitor pada lokasi yang tepat memungkinkan dapat memperbaiki faktor daya

dan perbaikan faktor daya tersebut dapat mengurangi penurunan tegangan pada sisi terima seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Dengan penambahan kapasitor *shunt*, kapasitas penyaluran daya dapat ditingkatkan.



Gambar 3 Fasor tegangan terima sebelum (a) dan sesudah dipasang kapasitor *Shunt* (b).
(Sumber: Robandi, 2006)

Dari Gambar 3, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_{R1} = V_s - (I_R R + jI_L X_S) \quad (14)$$

$$V_{R2} = V_s - (I_R R + jI_L X_S - jI_C X_S) \quad (15)$$

$$\Delta V_R = V_{R2} - V_{R1} \quad (16)$$

$$= [V_s - (I_R R + jI_L X_S - jI_C X_S)] - [V_s - (I_R R + jI_L X_S)]$$

$$= jI_C X_S$$

Keterangan:

I_R = Komponen *real* arus.

I_L = Komponen arus reaktif *lagging* terhadap tegangan.

I_C = Komponen arus reaktif *leading* terhadap tegangan.

R = Resistansi saluran.

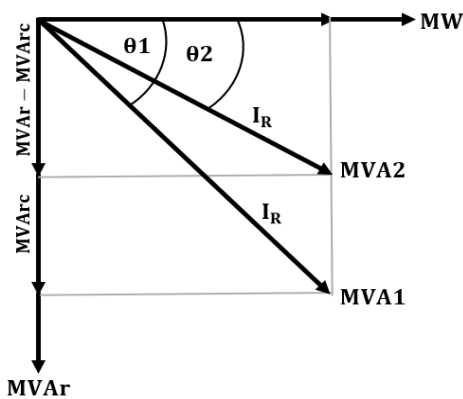
X_S = Reaktansi saluran.

V_R = Tegangan pada sisi terima

V_s = Tegangan pada sisi pengirim.

Ketika pemasangan kapasitor *shunt*, terjadi injeksi arus I_C pada sistem, sehingga faktor daya meningkat dan I_L berkurang. Hal itu mengakibatkan tegangan jatuh berkurang ($I_L \times X_S$) sehingga tegangan V_R meningkat.

Pada persamaan (16), dijelaskan bahwa dengan tegangan kirim yang sama akan diperoleh tegangan terima yang lebih besar ketika sistem ditambahkan kapasitor *shunt*. Penambahan kapasitor *shunt* juga meningkatkan faktor daya bus, sehingga tegangan bus juga meningkat. Untuk memperoleh hasil yang optimal, kekurangan daya reaktif yang dibutuhkan oleh beban dapat dipenuhi kapasitor *shunt* yang ditempatkan pada lokasi bus yang tepat, sehingga diperoleh faktor daya pada bus sama dengan 1 atau mendekati 1. Berikut fasor perbandingan besar daya semu yang dibutuhkan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor *shunt* seperti pada Gambar 4.



Gambar 4 Perbandingan besar daya semu yang dibutuhkan sebelum dan sesudah penambahan kapasitor. (Sumber: Robandi, 2006)

Dari fasor Gambar 4 di atas, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$MVA1 = MW + jMVArc \quad (17)$$

$$MVA2 = MW + jMVArc - jMVArc \quad (18)$$

$$\Delta MVA = MVA2 - MVA1 = jMVArc \quad (19)$$

$$\text{Rata - rata} = \frac{\text{Jumlah nilai}}{\text{Banyaknya data}} \quad (20)$$

Keterangan:

MVA = Daya semu atau daya total.

MW = Daya aktif atau daya nyata.

MVArc = Daya reaktif.

MVArc = Injeksi daya reaktif dari kapasitor.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian dimulai dengan mengkaji teori-teori, hasil penelitian sebelumnya, serta berdasarkan fenomena nyata sehingga muncul sebab permasalahan. Pendekatan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif yaitu penelitian yang melakukan pengamatan pada objek untuk mengumpulkan data-data yang disajikan dengan angka-angka untuk keperluan dalam penelitian. Dalam hal ini, peneliti menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh *optimal capacitor placement* (OCP) terhadap kondisi faktor daya, tegangan dan arus di saluran pada subsistem jaringan distribusi 20 kV dengan mengumpulkan data-data parameter sistem sebagai *input* data. Kemudian data tersebut diolah dalam permodelan simulasi sistem menggunakan *software* ETAP 12.6.0.

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data merupakan metode yang digunakan untuk memperoleh data yang diperlukan untuk penelitian. Dalam penelitian ini menggunakan dua metode teknik pengumpulan data seperti berikut:

1. Metode Wawancara

Metode wawancara merupakan teknik pengumpulan data yang dilakukan melalui tatap muka dan tanya jawab dengan narasumber. Melalui wawancara diperoleh beberapa informasi tentang konfigurasi dan aliran daya khususnya pada jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan.

2. Metode Observasi

Metode observasi yaitu pengamatan dan pencatatan langsung secara sistematis terhadap data yang dibutuhkan untuk penelitian. Dari observasi data penulis memperoleh berbagai data yang diperlukan dalam penelitian, diantaranya:

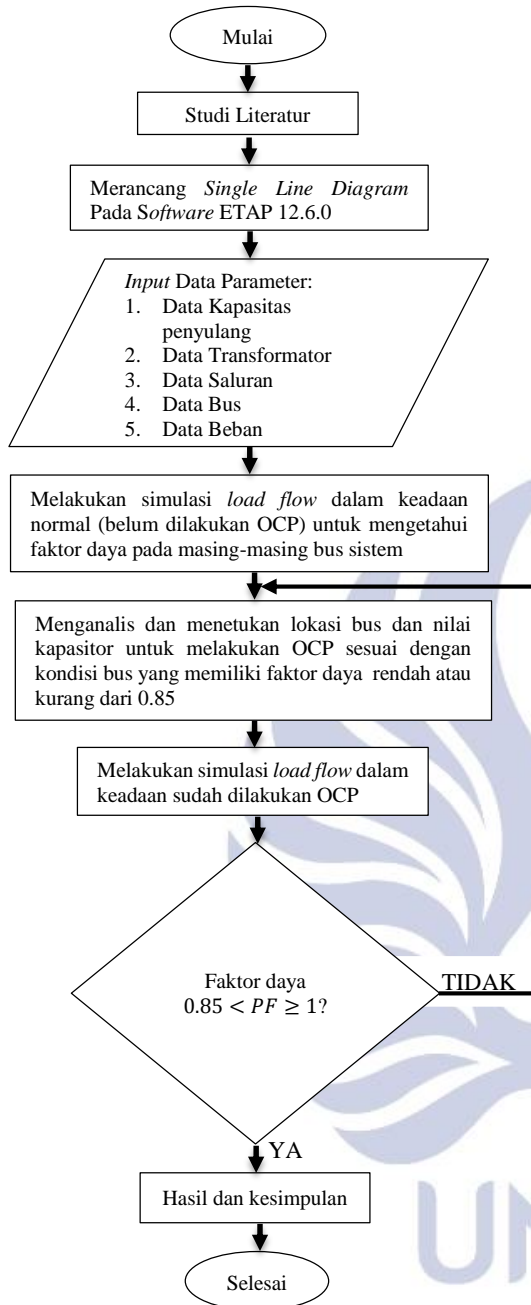
- Data *single line diagram*.
- Data beban.
- Data bus.
- Data spesifikasi saluran yang digunakan.
- Data spesifikasi transformator terpasang.
- Data kapasitas penyulang Bandilan.

Analisis Data

Analisis data pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tahapan mulai penelitian hingga selesai. Berikut adalah uraian tahapan pelaksanaan penelitian ini, anataralain:

- Melakukan studi literatur dengan mempelajari beberapa jurnal dan *text book* tentang *optimal capacitor placement* (OCP) serta referensi lain yang berkaitan dengan penelitian ini.
- Melakukan survei untuk mencari data operasi dan *single line diagram* subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan.
- Membuat pemodelan *single line diagram* subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan menggunakan *software* ETAP 12.6.0.
- Melakukan *input* data berupa data kapasitas penyulang, data bus, data spesifikasi transformator terpasang, data parameter saluran dan data operasi beban.
- Melakukan analisis aliran daya pada subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan pada keadaan sebelum dilakukan OCP.
- Menentukan kandidat bus dan nilai kapasitor untuk melakukan OCP sesuai dengan kondisi bus yang memiliki faktor daya rendah atau kurang dari 0.85
- Melakukan analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan pada keadaan sesudah dilakukannya OCP.
- Mengidentifikasi bus sistem sesudah dilakukannya OCP dari hasil analisis aliran daya pada keadaan sesudah dilakukannya OCP.
- Kondisi faktor daya $0.85 < PF \geq 1$?
- Jika “Ya” dapat dilanjutkan pada langkah berikutnya.
- Jika “Tidak” melakukan alternatif untuk pemilihan bus lain yang memenuhi kriteria untuk dijadikan kandidat OCP hingga memenuhi kondisi faktor daya memenuhi $rating\ 0.85 < PF \geq 1$.
- Menarik kesimpulan.
- Selesai.

Berikut uraian tahapan pelaksanaan penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Diagram Alir Penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini akan dibahas perbaikan faktor daya di jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan. Perbaikan faktor daya dilakukan dengan melakukan *optimal capacitor placement* (OCP) pada jaringan distribusi. Penentuan lokasi dan besarnya kapasitas kapasitor dalam melakukan OCP dilakukan berdasarkan pada kondisi faktor daya simulasi aliran daya (*load flow*) pada *software* ETAP 12.6.0. Pada penentuan lokasi dan ukuran kapasitor pada sistem akan diawali dari analisis bus yang memiliki faktor daya rendah atau dibawah 0.85 yang lokasinya paling jauh dari *Power Grid*, lalu dianalisis dengan menghitung berapa besar nilai kapasitor yang diperlukan untuk memenuhi faktor daya dengan nilai lebih dari nol koma delapan lima kurang dari sama dengan satu ($0.85 < PF \leq 1$)

1). Pemilihan kandidat bus OCP dilakukan dengan mengetahui kondisi faktor daya yang memiliki nilai dibawah 0.85 dimulai dari bus yang mempunyai lokasi paling jauh dari *Power Grid* dikarenakan untuk menyesuaikan dengan model injeksi arus kompensasi kapasitor yaitu menuju bus yang berada di atasnya. Dengan melakukan kompensasi daya reaktif pada lokasi yang tepat diharapkan dapat mengurangi aliran daya reaktif pada saluran, sehingga dapat memperbaiki kondisi tegangan, faktor daya, mereduksi arus pada saluran dan mengurangi rugi-rugi daya pada saluran.

Penentuan lokasi dan besarnya nilai kompensasi daya reaktif (OCP) dilakukan dengan bantuan *load flow* pada *software* ETAP 12.6.0 untuk mengetahui kondisi faktor daya pada aliran daya sistem. Pada hasil *load flow* terdapat kondisi bus yang mempunyai nilai faktor daya dibawah 0.85, yaitu bus 28 dan bus 55. Untuk uraian kondisi faktor daya bus tersebut selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini:

Tabel 1 Uraian Kondisi Kandidat Bus Kompensasi

NO	KODE BUS	P (KW)	FAKTOR DAYA
1	28	1157	0.8314
2	55	55.978	0.8014

Dari uraian kondisi faktor daya pada Tabel 1, diketahui besarnya nilai daya aktif dan nilai faktor daya pada bus 28 dan bus 55. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan nilai kompensasi daya reaktif (QC) yang diperlukan oleh bus 28 dan bus 55 untuk mencapai kondisi faktor daya target yaitu satu menggunakan persamaan (8).

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui sudut θ pada bus 28 adalah 33.75717° dan sudut θ yang hendak dicapai adalah 0° . Untuk mendapatkan faktor daya target pada bus 28 dibutuhkan kompensasi daya reaktif sebesar 750 kVAr. Sedangkan pada bus 55 diketahui sudut θ adalah 36.73599° dan sudut θ target yang hendak dicapai adalah 0° . Untuk mendapatkan faktor daya target pada bus 55 dibutuhkan kompensasi daya reaktif sebesar 40 kVAr. Berikut uraian kompensasi daya reaktif secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Kompensasi Daya Reaktif

NO	KODE BUS	KOMPENSASI DAYA REAKTIF (QC)
1	28	750 kVAr
2	55	40 kVAr
Total		790 kVAr

Perbandingan Kondisi Sistem Sebelum Dan Sesudah Dilakukan *Optimal Capacitor Placement* (OCP).

Perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah dilakukan OCP bertujuan untuk mengetahui kondisi perbaikan sistem. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan secara spesifik dari kedua hasil tersebut untuk mengetahui kondisi perubahan sistem secara rinci. Berikut perbandingan uraian hasil aliran daya dalam keadaan normal (belum dilakukan OCP) dan kondisi sesudah dilakukan OCP yang meliputi kondisi faktor daya, tegangan bus dan arus yang mengalir pada saluran serta

rugi-rugi daya pada saluran masing-masing bus seperti ditunjukkan pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6 berikut ini.

Tabel 3 Kondisi Faktor Daya Sistem

KODE BUS	FAKTOR DAYA (%)		
	BEFORE OCP	AFTER OCP	PERBAIKAN
2	86.61	91.49	4.88
3	86.67	91.56	4.89
4	86.69	91.68	4.99
5	86.72	91.75	5.03
6	86.88	92.06	5.18
7	86.93	92.21	5.28
8	86.95	92.26	5.31
9	86.96	92.28	5.32
10	86.97	92.29	5.32
11	85.3	85.3	0
12	85.59	85.59	0
13	87.08	92.73	5.65
14	87.09	92.77	5.68
15	87.1	92.79	5.69
16	87.1	92.81	5.71
17	86.82	86.82	0
18	87.24	87.24	0
19	89.35	89.35	0
20	91.75	91.75	0
21	85.4	85.4	0
22	93.59	93.59	0
23	93.79	93.79	0
24	86.06	93.9	7.84
25	86.08	93.95	7.87
26	86.11	94.24	8.13
27	83.35	99.67	16.32
28	83.14	99.97	16.83
29	85.34	85.34	0
30	85.34	85.34	0
31	85.38	85.38	0
32	85.36	85.36	0
33	85.44	85.44	0
34	85.45	85.45	0
35	85.4	85.4	0
36	85.35	85.35	0
37	85.47	85.47	0
38	88.65	88.65	0
39	88.86	88.86	0
40	85.29	85.29	0
41	85.34	85.34	0
42	85.59	85.59	0
43	85.36	85.36	0
44	92.93	92.93	0
45	93.04	93.04	0
46	85.7	85.7	0
47	85.85	85.85	0
48	84.78	88.38	3.6
49	84.69	88.76	4.07
50	84.22	90.88	6.66
51	84.08	91.26	7.18
52	84.4	93.56	9.16
53	84.04	97.63	13.59
54	80.97	99.34	18.37
55	80.14	99.94	19.8
Rata-rata	86.40333	90.26167	3.85833

Dari Tabel 3 dapat diketahui perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah dilakukan OCP. Pada bus 1 kondisi faktor daya sebelum dilakukan OCP yaitu sebesar 86.61% dan sesudah dilakukan OCP sebesar 91.49% atau mengalami perbaikan nilai faktor daya sebesar 4.88%. Pada bus 2 kondisi faktor daya sebelum dilakukan OCP

yaitu sebesar 86.67% dan sesudah dilakukan OCP sebesar 91.56% atau mengalami perbaikan nilai faktor daya sebesar 4.89%. Pada bus 3 kondisi faktor daya sebelum dilakukan OCP yaitu sebesar 86.69% dan sesudah dilakukan OCP sebesar 91.68% atau mengalami perbaikan nilai faktor daya sebesar 4.99%. Pada bus 4 kondisi faktor daya sebelum dilakukan OCP yaitu sebesar 86.72% dan sesudah dilakukan OCP sebesar 91.75% atau mengalami perbaikan nilai faktor daya sebesar 5.03%. Pada bus 5 kondisi faktor daya sebelum dilakukan OCP yaitu sebesar 86.88% dan sesudah dilakukan OCP sebesar 92.06% atau mengalami perbaikan nilai faktor daya sebesar 5.18% dan seterusnya. Hasil rata-rata dari perbaikan nilai faktor daya sistem keseluruhan adalah 3.85833%.

Tabel 4 Kondisi Tegangan Sistem

KODE BUS	TEGANGAN (KV)		
	BEFORE OCP	AFTER OCP	PERBAIKAN
2	19.957	19.961	0.004
3	19.956	19.961	0.005
4	19.948	19.954	0.006
5	19.948	19.954	0.006
6	19.935	19.942	0.007
7	19.931	19.939	0.008
8	19.922	19.931	0.009
9	19.92	19.929	0.009
10	19.92	19.929	0.009
11	19.92	19.929	0.009
12	19.92	19.929	0.009
13	19.919	19.928	0.009
14	19.918	19.928	0.01
15	19.918	19.927	0.009
16	19.916	19.926	0.01
17	19.914	19.924	0.01
18	19.914	19.924	0.01
19	19.914	19.923	0.009
20	19.913	19.922	0.009
21	19.913	19.922	0.009
22	19.912	19.922	0.01
23	19.912	19.922	0.01
24	19.907	19.918	0.011
25	19.906	19.918	0.012
26	19.906	19.918	0.012
27	19.906	19.918	0.012
28	19.906	19.918	0.012
29	19.906	19.917	0.011
30	19.906	19.917	0.011
31	19.906	19.917	0.011
32	19.906	19.917	0.011
33	19.889	19.901	0.012
34	19.889	19.901	0.012
35	19.889	19.901	0.012
36	19.906	19.917	0.011
37	19.906	19.917	0.011
38	19.906	19.917	0.011
39	19.906	19.917	0.011
40	19.905	19.916	0.011
41	19.904	19.916	0.012
42	19.904	19.916	0.012
43	19.904	19.916	0.012
44	19.905	19.916	0.011
45	19.905	19.916	0.011
46	19.905	19.916	0.011
47	19.905	19.916	0.011
48	19.945	19.951	0.006
49	19.945	19.951	0.006
50	19.945	19.951	0.006
51	19.945	19.951	0.006

KODE BUS	TEGANGAN (KV)		
	BEFORE OCP	AFTER OCP	PERBAIKAN
52	19.945	19.951	0.006
53	19.945	19.951	0.006
54	19.945	19.951	0.006
55	19.945	19.951	0.006
Rata-rata	19.9182	19.92761	0.00941

Dari Tabel 4 dapat diketahui perbedaan tegangan pada saat sebelum dan sesudah dilakukan OCP. Pada bus 1 kondisi tegangan sebelum dilakukan OCP adalah 19.957 kV dan sesudah dilakukan OCP nilai tegangan mengalami peningkatan menjadi 19.961 kV atau mengalami perbaikan sebesar 0.004 kV. Pada bus 2 kondisi tegangan sebelum dilakukan OCP adalah 19.956 kV dan sesudah dilakukan OCP nilai tegangan mengalami peningkatan menjadi 19.961 kV atau mengalami perbaikan sebesar 0.006 kV. Pada bus 3 kondisi tegangan sebelum dilakukan OCP adalah 19.948 kV dan sesudah dilakukan OCP nilai tegangan mengalami peningkatan menjadi 19.954 kV atau mengalami perbaikan sebesar 0.006 kV. Pada bus 4 kondisi tegangan sebelum dilakukan OCP adalah 19.948 kV dan sesudah dilakukan OCP nilai tegangan mengalami peningkatan menjadi 19.954 kV atau mengalami perbaikan sebesar 0.006 kV. Pada bus 5 kondisi tegangan sebelum dilakukan OCP adalah 19.935 kV dan sesudah dilakukan OCP nilai tegangan mengalami peningkatan menjadi 19.942 kV atau mengalami perbaikan sebesar 0.007 kV dan seterusnya. Hasil rata-rata dari perbaikan nilai tegangan sistem keseluruhan adalah 0.00941 kV.

Tabel 5 Kondisi Arus Pada Saluran

SALURAN	ARUS PADA SALURAN (A)		
	BEFORE OCP	AFTER OCP	REDUKSI
Cable 1	192.7	182.4	10.3
Cable 2	191.8	181.5	10.3
Cable 3	188.1	177.9	10.2
Cable 4	186	175.8	10.2
Cable 5	170.3	160.6	9.7
Cable 6	166.6	157	9.6
Cable 7	165.5	155.9	9.6
Cable 8	165.2	155.7	9.5
Cable 9	164.8	155.3	9.5
Cable 10	6.312	6.31	0.002
Cable 11	1.313	1.313	0
Cable 12	153.9	144.5	9.4
Cable 13	152.9	143.5	9.4
Cable 14	152.6	143.2	9.4
Cable 15	152.1	142.7	9.4
Cable 16	11.71	11.71	0
Cable 17	8.886	8.883	0.003
Cable 18	4.14	4.138	0.002
Cable 19	24.46	24.45	0.01
Cable 20	3.868	3.867	0.001
Cable 21	18.17	18.16	0.01
Cable 22	17.62	17.61	0.01
Cable 23	111.2	101.9	9.3
Cable 24	110.5	101.2	9.3
Cable 25	106.4	97.17	9.23
Cable 26	44.5	37.2	7.3
Cable 27	40.36	33.55	6.81
Cable 28	19.53	19.52	0.01
Cable 29	17.36	17.36	0
Cable 30	11.58	11.58	0
Cable 31	10.03	10.02	0.01

KODE BUS	ARUS PADA SALURAN (A)		
	BEFORE OCP	AFTER OCP	REDUKSI
Cable 32	5.334	5.332	0.002
Cable 33	5.185	5.183	0.002
Cable 34	3.841	3.839	0.002
Cable 35	9.22	9.216	0.004
Cable 36	3.413	3.412	0.001
Cable 37	48.16	48.14	0.02
Cable 38	45.05	45.03	0.02
Cable 39	14.23	14.23	0
Cable 40	10.19	10.19	0
Cable 41	2.102	2.101	0.001
Cable 42	2.069	2.068	0.001
Cable 43	19.25	19.24	0.01
Cable 44	18.87	18.87	0
Cable 45	2.293	2.293	0
Cable 46	0.95	0.949	0.001
Cable 47	14.12	13.54	0.58
Cable 48	12.47	11.9	0.57
Cable 49	7.56	7.006	0.554
Cable 50	7.004	6.453	0.551
Cable 51	4.858	4.33	0.528
Cable 52	2.955	2.483	0.472
Cable 53	2.334	1.902	0.432
Cable 54	2.022	1.621	0.401
Rata-rata	55.81331	52.61609	3.19722

Dari Tabel 5 dapat diketahui perbedaan arus pada saluran sebelum dan sesudah dilakukan OCP. Pada *cable* 1 kondisi arus pada saluran sebelum dilakukan OCP sebesar 192.7 A dan sesudah dilakukan OCP nilai arus pada saluran mengalami reduksi menjadi 182.4 A atau mengalami perbaikan sebesar 10.3 A. Pada *cable* 2 kondisi arus pada saluran sebelum dilakukan OCP sebesar 191.8 A dan sesudah dilakukan OCP nilai arus pada saluran mengalami reduksi menjadi 181.5 A atau mengalami perbaikan sebesar 10.3 A. Pada *cable* 3 kondisi arus pada saluran sebelum dilakukan OCP sebesar 188.1 A dan sesudah dilakukan OCP nilai arus pada saluran mengalami reduksi menjadi 177.9 A atau mengalami perbaikan sebesar 10.2 A. Pada *cable* 4 kondisi arus pada saluran sebelum dilakukan OCP sebesar 186 A dan sesudah dilakukan OCP nilai arus pada saluran mengalami reduksi menjadi 175.8 A atau mengalami perbaikan sebesar 10.2 A. Pada bus 5 kondisi arus pada saluran sebelum dilakukan OCP sebesar 170.3 A dan sesudah dilakukan OCP nilai arus pada saluran mengalami reduksi menjadi 160.6 A atau mengalami perbaikan sebesar 9.7 A dan seterusnya. Hasil rata-rata dari perbaikan nilai arus pada saluran secara keseluruhan adalah 3.19722 A.

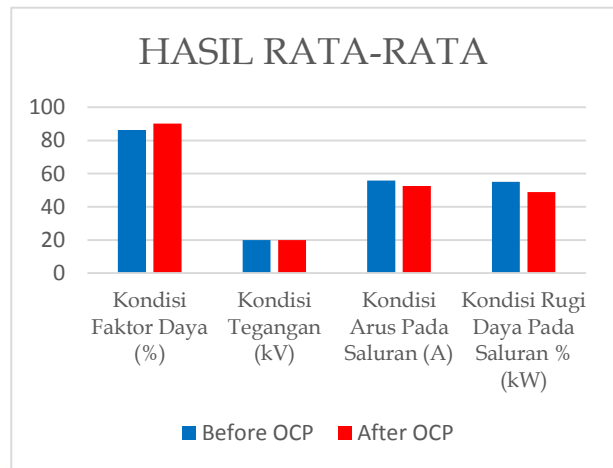
Tabel 6 Kondisi Rugi-rugi Daya Pada Saluran

SALURAN	RUGI-RUGI DAYA (KW)		
	BEFORE OCP	AFTER OCP	REDUKSI
Cable 1	8.90456	7.97809	0.92647
Cable 2	0.73207	0.65555	0.07652
Cable 3	2.03798	1.82295	0.21503
Cable 4	0.03114	0.02782	0.00332
Cable 5	4.1009	3.64704	0.45386
Cable 6	2.10942	1.87332	0.2361
Cable 7	3.37174	2.99192	0.37982
Cable 8	1.32362	1.17576	0.14786
Cable 9	0.74687	0.66325	0.08362
Cable 10	0.00004	0.00004	0
Cable 11	0.00005	0.00005	0

KODE BUS	RUGI-RUGI DAYA (KW)		
	BEFORE OCP	AFTER OCP	REDUKSI
Cable 12	0.73424	0.64729	0.08695
Cable 13	0.68499	0.60335	0.08164
Cable 14	0.82668	0.72797	0.09871
Cable 15	1.0503	0.92449	0.12581
Cable 16	0.03203	0.03203	0
Cable 17	0.00421	0.00421	0
Cable 18	0.0008	0.00079	0.00001
Cable 19	0.12462	0.12452	0.0001
Cable 20	0.00041	0.00041	0
Cable 21	0.01182	0.01181	0.00001
Cable 22	0.01645	0.01644	0.00001
Cable 23	1.81772	1.52639	0.29133
Cable 24	0.49574	0.4158	0.07994
Cable 25	0.11321	0.09442	0.01879
Cable 26	0.09129	0.0638	0.02749
Cable 27	0.0347	0.02398	0.01072
Cable 28	0.01358	0.01356	0.00002
Cable 29	0.00756	0.00756	0
Cable 30	0.00184	0.00184	0
Cable 31	0.00209	0.00209	0
Cable 32	0.00044	0.00044	0
Cable 33	0.00283	0.00283	0
Cable 34	0.00034	0.00034	0
Cable 35	0.00734	0.00733	0.00001
Cable 36	0.00021	0.00021	0
Cable 37	0.10924	0.10915	0.00009
Cable 38	0.06718	0.06712	0.00006
Cable 39	0.02426	0.02426	0
Cable 40	0.01212	0.01212	0
Cable 41	0.00006	0.00006	0
Cable 42	0.0006	0.0006	0
Cable 43	0.03695	0.03691	0
Cable 44	0.01681	0.01681	0
Cable 45	0.00065	0.00065	0
Cable 46	0.00004	0.00004	0
Cable 47	0.04781	0.04396	0.00385
Cable 48	0.00037	0.00034	0.00003
Cable 49	0.00122	0.00105	0.00017
Cable 50	0.00109	0.00092	0.00017
Cable 51	0.00035	0.00028	0.00007
Cable 52	0.00015	0.00011	0.00004
Cable 53	0.00029	0.00019	0.0001
Cable 54	0.00009	0.00006	0.00003
Rata-rata	0.55098	0.48896	0.06202
Total Reduksi Rugi-rugi Daya			3.34879

Dari uraian Tabel 6 bisa diketahui kondisi rugi-rugi daya pada saluran sebelum dan sesudah dilakukan OCP. Dengan terjadinya reduksi arus pada saluran, maka secara tidak langsung akan mempengaruhi rugi-rugi daya pada saluran. Nilai rugi-rugi daya pada saluran berbanding lurus dengan kondisi arus yang mengalir pada saluran. Kondisi rugi-rugi daya paling besar terdapat pada *cable 1*, karena lokasinya paling dekat dengan *power grid* sehingga dialiri arus listrik paling besar. Total reduksi keseluruhan rugi daya pada sistem yaitu sebesar 3.34879 kW.

Dari hasil analisis sebelum dan sesudah dilakukan *optimal capacitor placement* (OCP), didapatkan kondisi faktor daya, nilai tegangan, arus pada saluran dan rugi-rugi daya pada saluran seperti ditunjukkan pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6 Kondisi sistem sebelum dan sesudah dilakukan OCP.

PENUTUP Simpulan

Lokasi pemasangan penambahan kapasitor yang tepat untuk memenuhi tercapainya nilai faktor daya $0.85 < PF \geq 1$ pada subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang bandilan berdasarkan hasil analisis aliran daya pada *software* ETAP 12.6.0 yaitu di 2 lokasi bus berbeda, diantaranya: bus 28 dan bus 55.

Besarnya nilai kompensasi daya reaktif mengacu pada Tabel 2 hasil analisis aliran daya pada *software* ETAP 12.6.0 yaitu bus 28 sebesar 750 kVAr dan bus 55 sebesar 40 kVAr, dengan total seluruhnya mencapai 790 kVAr.

Mengacu pada hasil perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah dilakukan *optimal capacitor placement* (OCP), kondisi sistem mengalami perbaikan diantaranya: perbaikan nilai faktor daya sebesar 4.46549% (0.0385833), reduksi nilai arus pada saluran sebesar 5.72842% (3.19722 A), perbaikan nilai tegangan sebesar 0.04724% (0.00941 kV) dan terjadi reduksi rugi-rugi daya pada saluran sebesar 11.25449% (0.06202 kW).

Saran

Hasil penelitian ini dapat dipergunakan untuk rekomendasi penempatan dan pemasangan kapasitor tambahan di subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan.

Hasil penelitian ini dapat dipergunakan untuk melakukan evaluasi berkala pada subsistem jaringan distribusi 20 kV penyulang Bandilan dengan memperhatikan perubahan beban.

DAFTAR PUSTAKA

- Chopade, Pravin & Marwan Bikdash. 2011. "Minimizing Cost and Power losses by Optimal Placement of Capacitor using ETAP". Computational Science and Engineering Department, Department of Electrical and Computer Engineering North Carolina A & T State University Greensboro, USA. IEEE 978-1-4244-9593-1, 2011.
- Daryanto, 2014. "Konsep Dasar Teknik Elektro Kelistrikan". Bandung: Alfabeta.

- Hutauruk, T.S. 1985. *“Transmisi Daya Listrik”*. Jakarta: Erlangga.
- Marsudi, Djiteng. 2006. *“Operasi Sistem Tenaga Listrik”*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Robandi, Imam. 2006. *“Desain Sistem Tenaga Modern”*. Yogyakarta: C.V Andi Offset.
- Saini, Satish dkk. 2016 *“A Case Study for Loss Reduction in Distribution Networks using Shunt Capacitors”*. Poorima University, RRVPNL, EEE Dept. Arya College of Engg., & LT., Jaipur, India. IEEE 978-1-4673-8587, 2016.
- Whitaker, Jerry C. 1999. *“Power Distribution and Control”*. 2nd Edition. Jerry C. Whitaker Boca Raton: CRC Press LLC.

