

ANALISIS PERENCANAAN KOMPENSATOR DAYA KAPASITIF DI GARDU INDUK (GI) SUMENEP UNTUK PERBAIKAN JATUH TEGANGAN

**Muhammad Fahmi Hakim¹, Sigi Syah Wibowo², Agung
Laksono Pamuji³**

^{1,2,3}Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik
Negeri Malang

Abstrak

Pada tanggal 1 Desember 2016, pukul 19.00 WIB di GI Sumenep, saat beban puncak, tegangan di sisi 150 kV hanya mencapai 138 kV. Dengan mengacu pada Peraturan Menteri ESDM No. 03 Tahun 2007, nilai tegangan sebesar 138 kV sudah hampir mencapai batas minimal standard. Saat itu pihak PLN telah melakukan dua tindakan untuk menaikkan tegangan supaya di atas batas yang ditetapkan, yaitu dengan melakukan operasi penambahan daya reaktif dan taping transformator. Selain kedua solusi itu, ada satu cara lagi untuk mengatasi jatuh tegangan yaitu dengan menggunakan *shunt capacitor*. PT. PLN telah melakukan kajian untuk memasang *shunt capacitor* dengan kapasitas 25 MVAR namun saat ini masih belum terpasang. Dari hasil analisis dan perhitungan, kapasitas *shunt capacitor* yang diperlukan untuk mencapai tegangan nominal 150 kV saat beban puncak di GI Sumenep adalah sebesar 46,36 MVAR. Akan tetapi jika dipasang *shunt capacitor* dengan kapasitas 25 MVAR sesuai dengan keputusan PT. PLN maka tetap memenuhi syarat karena tegangan di Gardu Induk Sumenep bernilai 146,018 kV yang artinya masih di dalam standard tegangan yang diatur oleh Peraturan Menteri ESDM No: 03 Tahun 2007. Karena di pasaran tidak tersedia kapasitor sebesar 25 MVAR, maka nilai itu diperoleh dengan menghubungkan enam belas unit kapasitor masing-masing sebesar 521 kVAR secara seri dan paralel pada setiap fasa sehingga memenuhi nilai total sebesar 25 MVAR.

Kata-kata kunci: GI Sumenep, jatuh tegangan, *shunt capacitor*.

Abstract

On December, 1st, 2016, at 7:00 p.m. at Sumenep Substation, when peak load occurred, the voltage on the 150 kV side only reached 138 kV. With

reference to ESDM Ministerial Regulation No. 03 of 2007, the voltage value of 138 kV has almost reached the minimum standard. At that time the PLN had taken two actions to increase the voltage, by carrying out the operation of adding reactive power and transformer taping. In addition to these two solutions, there is one more way to overcome voltage drop by using shunt capacitor. PT. PLN has conducted a study to install a shunt capacitor with a capacity of 25 MVAR but is currently not installed. From the results of the analysis and calculation, the capacitor shunt capacity needed to achieve a nominal voltage of 150 kV when the peak load in Sumenep GI is 46.36 MVAR. However, if a shunt capacitor is installed with a capacity of 25 MVAR in accordance with the decision of PT. PLN then still qualifies because the voltage at Sumenep Substation is worth 146.018 kV which means it is still within the voltage standard regulated by the ESDM Minister Regulation No: 03 of 2007. Because the capacitor is not available at 25 MVAR at market, the value is obtained by connecting six twelve capacitor units each of 521 kVAR in series and parallel in each phase so that the total value is 25 MVAR.

Keywords: *Sumenep Substation, voltage drop, shunt capacitor.*

1. PENDAHULUAN

Gardu Induk Sumenep merupakan gardu induk yang mempunyai sistem tegangan 150 kV dengan posisi paling ujung timur dalam subsistem Krian-Gresik. Dengan posisi yang paling ujung tersebut mempengaruhi tegangan yang diterima oleh Gardu Induk Sumenep, selain faktor perubahan beban yang terjadi. Pada tanggal 1 Desember 2016, pukul 19.00 WIB di Gardu Induk Sumenep, saat terjadi beban puncak, tegangan di sisi 150 kV hanya mencapai 138 kV. Peraturan Menteri ESDM No. 03 Tahun 2007, mensyaratkan bahwa tegangan dengan sistem 70 kV dan 150 kV hanya diperbolehkan mengalami variasi +5 % dan -10 % dari tegangan nominal. Dengan mengacu pada Peraturan Menteri ESDM tersebut, nilai tegangan sebesar 138 kV sudah hampir mencapai batas minimal standar yang diperbolehkan. Padahal pada saat itu pihak PLN telah melakukan dua tindakan untuk menaikkan tegangan supaya di atas batas yang ditetapkan, yaitu dengan melakukan operasi penambahan daya reaktif dan taping transformator. Ketika melakukan pengoperasian daya reaktif pada pembangkit, perlu diperhatikan kapasitas dari daya reaktif yang mampu dihasilkan oleh pembangkit karena pengaruh daya reaktif

tersebut akan berdampak langsung terhadap generator. Sedangkan ketika sering menggunakan tap trafo di gardu induk dapat mempengaruhi umur dari trafo tersebut sehingga cara ini belum terlalu efektif.

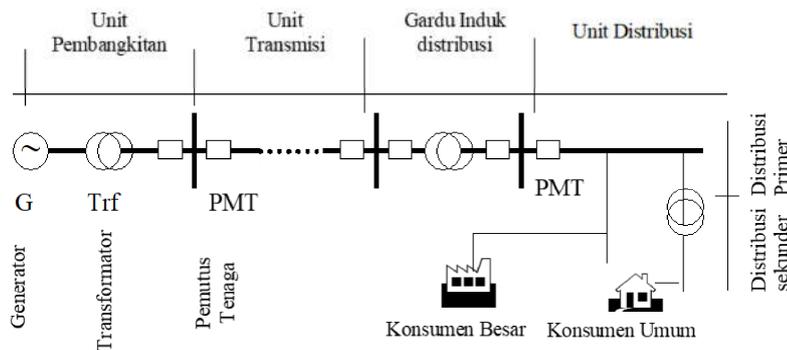
Selain kedua solusi di atas, terdapat satu cara lagi yang dapat digunakan untuk mengatasi jatuh tegangan yaitu dengan menggunakan *shunt capacitor*. PT. PLN (Persero) melalui Area Pengatur Beban Jawa Timur telah melakukan kajian untuk memasang *shunt capacitor* dengan kapasitas 25 MVAR namun saat ini masih *shunt capacitor* itu belum terpasang. Oleh karena itu sebelum kapasitor dengan kapasitas 25 MVAR dipasang, penulis merasa perlu diadakan analisis ulang perencanaan *shunt capacitor* di Gardu Induk Sumenep dalam rangka mengatasi jatuh tegangan.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 SISTEM TENAGA LISTRIK

Menurut Stevenson, suatu sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari 3 bagian utama yaitu pusat pembangkit tenaga listrik, saluran transmisi serta sistem distribusi. Selain itu dalam beberapa referensi ditambahkan satu bagian lagi yaitu Gardu Induk. Sistem tenaga listrik dimulai dari pusat pembangkit listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, dan pembangkit listrik tenaga lainnya yang bertugas memproduksi tenaga listrik. Kemudian tegangan keluaran dari pembangkit dinaikkan terlebih dahulu menggunakan transformator step-up sebelum disalurkan melalui saluran transmisi 70 kV atau 150 kV. Setelah melalui saluran transmisi, tenaga listrik masuk ke Gardu Induk (GI) yang selanjutnya diturunkan tegangannya menggunakan transformator step-down menjadi tegangan menengah 20 kV. Tegangan 20 kV disebut sebagai tegangan distribusi primer. Setelah diturunkan menjadi tegangan 20 kV, tenaga listrik keluar dari GI menuju jaringan distribusi yang sistem konfigurasinya bermacam-macam. Dari saluran distribusi primer, sebagian tegangan diturunkan kembali melalui transformator step-down yang terpasang pada gardu-gardu

distribusi menjadi tegangan rendah 220/380 volt. Selanjutnya dari jaringan tegangan rendah, listrik didistribusikan kepada konsumen TR seperti rumah, ruko, dll. Untuk konsumen tegangan tinggi dan menengah, sumber tenaga listrik langsung diambil dari incoming atau outgoing Gardu Induk.



GAMBAR 1. ILUSTRASI DIAGRAM SATU GARIS SISTEM TENAGA LISTRIK (ANONIM, 2013)

2.2 SHUNT CAPACITOR BANK

Salah satu cara penting dalam mengatur profil tegangan pada bus adalah penempatan *Shunt Capacitor* pada bus-bus, baik pada sistem transmisi ataupun distribusi, dipasang di sepanjang saluran, atau pada Gardu Induk dan beban. Pada dasarnya kapasitor adalah suatu alat untuk mencatu VAR pada titik pemasangannya (Stevenson, 1984: 200). Penentuan hubungan *Shunt Capacitor* harus mengacu pada standar yang ada, yaitu standar IEEE 1036 – 1992 seperti yang dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL 1. KLASIFIKASI HUBUNGAN PEMASANGAN KAPASITOR MENURUT STANDAR IEEE 1036-1992

Hubungan Pemasangan	Tegangan	Rating Tegangan	Keterangan
Delta	LV – MV	$\leq 35\text{kV}$	
<i>Grounded Wye</i>	– MV – HV	$1\text{kV} \leq V \leq 230\text{ kV}$	Jika ukuran <i>Capacitor</i> diatas

Hubungan Pemasangan	Tegangan	Rating Tegangan	Keterangan
<i>Ungrounded Wye</i> –	MV – HV	$1\text{kV} \leq V \leq 230\text{ kV}$	10 MVAR, maka <i>Capacitor</i> dapat dibagi menjadi 2 bagian <i>Wye(Double Wye)</i> .

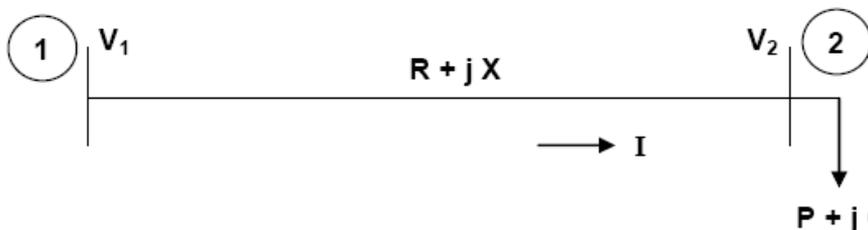
Sedangkan pemasangan fuse sebagai pengaman pada kapasitor dapat dilihat pada Tabel 2.

TABEL 2. PERBANDINGAN PEMASANGAN FUSE PADA *SHUNT CAPACITOR*

No.	Tipe Fuse	Tegangan	Hubungan	Prinsip Kerja
1.	<i>Externally Fuse</i>	HV	Paralel	Jika terjadi Hubung Singkat (HS) pada salah satu elemen kapasitor dalam suatu grup maka tegangan pada grup lainnya akan naik. Hal ini menyebabkan elemen kapasitor pada grup lain mengalami kegagalan operasi. Maka <i>externally fuse</i> akan putus ketika 2-3 elemen <i>Capacitor</i> mengalami HS.
2.	<i>Internally Fuse</i>	LV-MV	Seri	Jika terjadi HS pada salah satu elemen kapasitor dalam suatu grup maka kenaikan tegangan hanya terjadi pada elemen kapasitor dalam satu grup itu sendiri dan fuse pada elemen yang

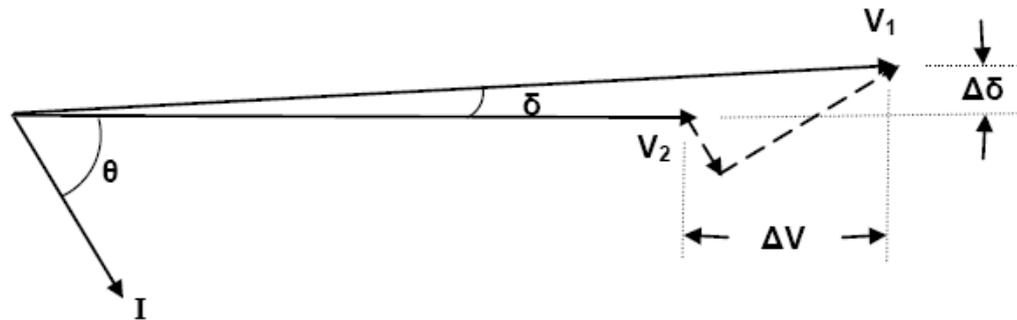
No.	Tipe Fuse	Tegangan	Hubungan	Prinsip Kerja
				rusak saja yang akan putus, sehingga elemen kapasitor yang lain tetap akan bisa beroperasi.
3.	Fuseless	HV	Seri	Jika terjadi HS pada salah satu elemen kapasitor dalam satu grup seri maka menyebabkan tegangan pada elemen grup seri mengalami kenaikan. Dan unit kapasitor tetap bisa beroperasi.

Pada Gambar 2 bus 1 merupakan bus pengirim dan bus 2 adalah bus penerima. Saluran ini memiliki impedansi $(R+jX) \Omega$.



GAMBAR 2. SALURAN TRANSMISI MENYUPLAI BEBAN

Dengan mengambil V_2 sebagai referensi, maka nilai arus yang muncul berbeda sudut fasa sebesar θ terhadap V_1 . Sementara nilai $R + jX$ yang merupakan nilai impedansi saluran transmisi, dan nilai $P + jQ$ yang merupakan nilai impedansi beban, dari kedua hal tersebut akan diperoleh nilai ΔV dan $\Delta \delta$, didapatkan diagram fasor seperti Gambar 2.



GAMBAR 2. DIAGRAM PHASOR

Dari diagram phasor di atas, dapat ditulis persamaan sebagai berikut:

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 + \Delta \delta^2 \quad (1)$$

dimana

$$\Delta V = \frac{RP}{V_2} + \frac{XQ}{V_2} \quad (2)$$

$$\Delta \delta = \frac{XP}{V_2} - \frac{RQ}{V_2} \quad (3)$$

Pada umumnya, $\Delta \delta$ akan lebih kecil dibandingkan $V_2 + \Delta V$. Sehingga dari Persamaan 1 didapatkan persamaan berikut:

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 \text{ dengan kata lain } V_1 = V_2 + \Delta V \quad (4)$$

Maka, jatuh tegangan pada saluran transmisi adalah

$$V_1 - V_2 = \Delta V = \frac{RP}{V_2} + \frac{XQ}{V_2} \quad (5)$$

Karena nilai resistansi R sangat kecil dibandingkan nilai reaktansi X, maka nilai R dapat diabaikan, sehingga diperoleh

$$\Delta V = \frac{XQ}{V_2} \quad (\text{B.M Weedy, 1998 : 85}) \quad (6)$$

Keterangan :

V_1 = Tegangan sisi kirim; V_2 = Tegangan sisi terima; P = Daya Aktif; Q = Daya Reaktif; ΔV = selisih V_1 dengan V_2 ; θ = Sudut antara I dgn V_1 ; δ = Sudut antara V_2 dgn V_1 ; $\Delta \delta = \theta - \delta$; I = Arus beban; R = Resistansi Saluran Transmisi; X = Reaktansi Saluran Transmisi.

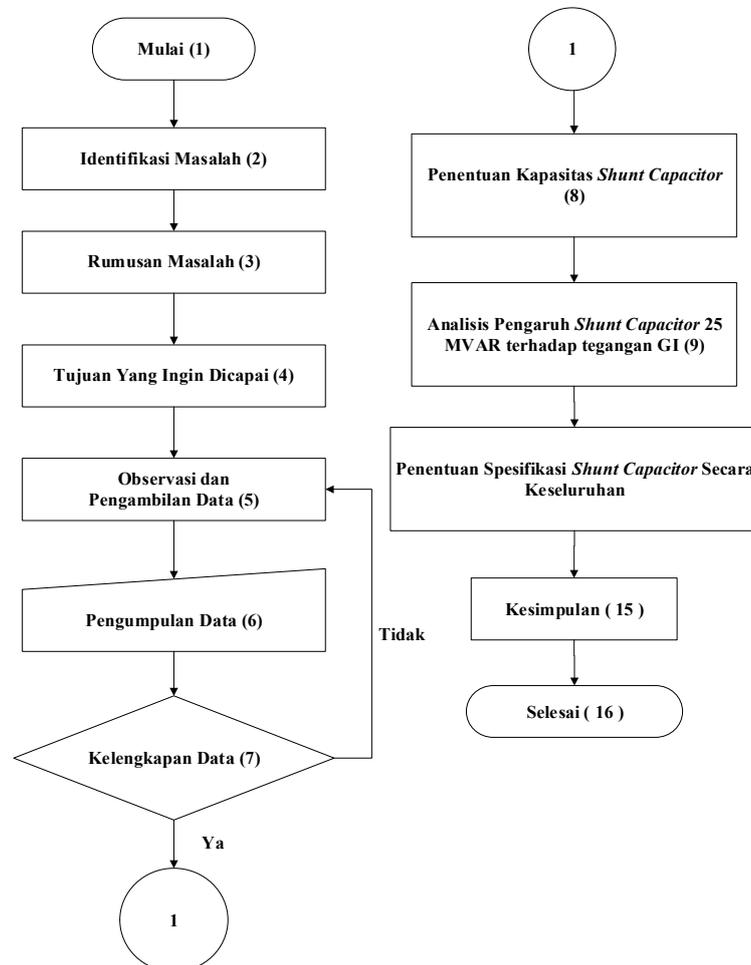
Dari persamaan 6 kita dapat mengetahui bahwa jatuh tegangan pada saluran transmisi sebanding dengan aliran daya reaktif pada saluran transmisi. Sebagian besar beban listrik adalah

induktif. Dalam sehari, selama waktu beban puncak, aliran daya reaktif akan semakin besar, sehingga mengakibatkan jatuh tegangan semakin meningkat. Selama beban minimal, semakin besarkapasitansi yang mengalir di saluran transmisi menyebabkan tegangan pada sisi penerima lebih besar daripada tegangan pada sisi pengirim (Ferranti Effect). Kontrol daya reaktif dibutuhkan dalam rangka menjaga jatuh tegangan yang terjadi pada saluran transmisi agar tetap dalam batas yang ditentukan. Selama beban puncak, jatuh tegangan dapat berkurang dengan memasang kapasitor secara paralel dengan sistem. Persamaan 6 dapat digunakan untuk menghitung besar kenaikan tegangan ketika dipasang *Shunt Capacitor*, dengan Q adalah besar kapasitor yang terpasang.

3. METODE

Langkah-langkah penyelesaian permasalahan adalah sebagai berikut. Langkah pertama adalah mengidentifikasi permasalahan yang ada di GI Sumenep yaitu adanya jatuh tegangan saat beban puncak. Setelah itu dilakukan perumusan masalah dan menentukan tujuan yang ingin dicapai di penelitian yaitu untuk menganalisis perencanaan *shunt capacitor* untuk menanggulangi jatuh tegangan. Langkah kelima yaitu pengambilan data gangguan dengan wawancara maupun observasi langsung di lapangan tentang diagram segaris Sub Sistem Krian-Gresik, data tegangan tiap bus, kapasitas *shunt capacitor* yang telah ditetapkan oleh PLN, dan data *shunt capacitor* yang ada di pasaran. Data yang didapat kemudian dikumpulkan dan ditulis ulang di komputer. Pengecekan kembali terhadap data – data yang diperlukan untuk analisis lebih lanjut, jika ada data yang kurang lengkap maka kembali ke langkah kelima. Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan, dilakukan perhitungan kapasitas *shunt capacitor*. Tahap kesembilan adalah melakukan kajian pengaruh *shunt capacitor* dengan kapasitas yang telah ditetapkan PLN terhadap tegangan di Gardu Induk Sumenep.

Selanjutnya dilakukan pemilihan *shunt capacitor* yang ada di pasaran sesuai desain yang telah direncanakan. Langkah berikutnya yaitu menyimpulkan hasil analisis.



GAMBAR 3. DIAGRAM ALIR PENELITIAN

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Peninjauan Kapasitas *Shunt Capacitor* Akan Terpasang

Gambar 4 menampilkan bagian dari Sub Sistem Krian-Gresik yang cukup luas. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa Gardu Induk Sumnenep (SMNEP) terhubung dengan Gardu Induk Sampang (SAMPG) dan Gardu Induk Pamekasan (PKSAN).

$$V_2 = \frac{141000 + \sqrt{141000^2 + (4 \times 29.31 \times 25000000)}}{2}$$

$$V_2 = 146.018kV$$

Dengan mengirimkan daya reaktif ke jaringan sebesar 25 MVAR maka nilai tegangan busbar di sisi terima yaitu di Gardu Induk Sumenep sebesar 146.018 kV. Nilai tersebut masih memenuhi standard jatuh tegangan sisi 150 kV (Peraturan Menteri ESDM No: 03 Tahun 2007) yaitu sebesar +5% dan -10%. Sehingga kajian awal PT. PLN menggunakan *shunt capacitor* 25 MVAR tidak menimbulkan dampak negatif meskipun tegangan di Gardu Induk Sumenep tidak mencapai nilai nominal ketika terjadi beban puncak.

Gardu Induk Sumenep menyuplai gardu Induk Pamekasan sehingga perlu dianalisis tegangan di Gardu Induk Pamekasan akibat pemasangan *shunt capacitor* 25 MVAR. Nilai impedansi jaringan dari Gardu Induk Sumenep ke Gardu Induk Pamekasan sebesar 28.82 Ohm dan di Gardu Induk Pamekasan sudah terpasang *Shunt Capacitor* 2 x 25 MVAR. Ketika Gardu Induk Sumenep dipasang *Shunt Capacitor* kapasitas 25 MVAR tegangan busbar di Gardu Induk Sumenep adalah 146.018 kV sebagai sisi kirim dan nilai tegangan di Gardu Induk Pamekasan sebagai sisi terima adalah:

$$V_2 = \frac{146018 + \sqrt{146018^2 + (4 \times 28.85 \times 50000000)}}{2}$$

$$V_2 = 155.2kV$$

Maka nilai tegangan busbar di Gardu Induk Pamekasan akibat pemasangan *Shunt Capacitor* di Gardu Induk Sumenep sebesar 25 MVAR adalah 155.2 kV, nilai ini masih memenuhi standard.

Karena di pasaran tidak tersedia kapasitor sebesar 25 MVAR, maka ukuran tersebut dapat diperoleh dengan menghubungkan beberapa unit kapasitor secara seri dan paralel pada setiap fasa

4.4 Pemilihan Karakteristik *Shunt Capacitor*

a. Tipe pengoperasian *shunt capacitor*

Dalam perencanaan ini akan dipasang *shunt capacitor* tipe pengoperasian *fixed*. Hal ini dikarenakan tegangan pada Gardu Induk Sumenep sudah terlalu rendah, sehingga membutuhkan suplai daya reaktif yang mampu memperbaiki tegangan agar tidak kurang dari standar. Dalam pengoperasian tipe *fixed*, ketika *shunt capacitor* diaktifkan maka akan secara langsung menyuplai daya reaktif sebesar 25 MVAR. Namun apabila tegangan di GI Sumenep sudah melampau batas nilai drop tegangan yang diijinkan oleh PLN, maka *shunt capacitor* akan dimatikan oleh pihak yang berwenang yaitu pihak Area Pengatur Beban.

b. Tipe Pemasangan Fuse pada *Capacitor*

Tipe pemasangan fuse pada *Shunt Capacitor* yang dipasang di Gardu Induk Sumenep dengan sistem tegangan 150 kV dipilih desain *Externally Fuse Capacitors* karena mampu untuk mengatasi kesalahan pada tegangan tinggi.

c. Rating Tegangan

Pemilihan rating tegangan *Shunt Capacitor* disesuaikan dengan rating tegangan di Gardu Induk Sumenep yaitu V_{L-L} 150 kV. Dengan memperhatikan juga susunan kapasitor di Gambar 5 maka tegangan satu unit kapasitor = $(150\text{kV}/\sqrt{3})/8$ unit kapasitor = 10.8 kV.

d. Rating frekuensi

Karena sistem frekuensi di Indonesia menggunakan 50 Hz, maka semua pemilihan peralatan harus memiliki rating frekuensi sebesar 50 Hz. Jika peralatan tidak sesuai dengan frekuensi yang ada, maka peralatan tersebut tidak dapat beroperasi.

Setelah melakukan berbagai pertimbangan, maka dipilih unit kapasitor dengan data teknis sebagai berikut: pabrik: COOPER POWER SYSTEM; tipe: EX – 7L; Un: 10825 Volt; Ui: 50/125 kV;

C: 14,29 mikrofarad; Q: 521 kVAR; frekuensi: 50 Hz; tahun pembuatan: 2005.

5. PENUTUP

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain:

- 1) nilai kapasitas *shunt capacitor* yang diperlukan untuk mencapai tegangan nominal 150 kV saat beban puncak di Gardu Induk Sumenep adalah sebesar 46,36 MVAR. Akan tetapi jika dipasang *shunt capacitor* dengan kapasitas 25 MVAR sesuai dengan keputusan PT. PLN maka tetap memenuhi syarat karena tegangan di Gardu Induk Sumenep bernilai 146,018 kV yang artinya masih di dalam standard tegangan yang diatur oleh Peraturan Menteri ESDM No: 03 Tahun 2007;
- 2) karena di pasaran tidak tersedia kapasitor sebesar 25 MVAR, maka nilai itu diperoleh dengan menghubungkan enam belas unit kapasitor masing-masing sebesar 521 kVAR secara seri dan paralel pada setiap fasa sehingga memenuhi nilai total sebesar 25 MVAR;
- 3) setelah melakukan perhitungan dan analisis maka dipilih *shunt capacitor* dengan spesifikasi sebagai berikut, pabrik: COOPER POWER SYSTEM; tipe: EX – 7L; Un: 10825 Volt; Ui: 50/125 kV; C: 14,29 mikrofarad; Q: 521 kVAR; frekuensi: 50 Hz; tahun pembuatan: 2005.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. 1992. IEEE 1036-1992. 1992. *IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors*. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [2] Anonim. 2014. *Buku Pedoman Pemeliharaan Kapasitor*. Jakarta: Pusdiklat PT. PLN (Persero).
- [3] Stephen, O. O; Yanli, L; Hui, S. 2011. *International Journal of Electrical & Sciences IJECS – IJENS Vol : 11 No : 06*. Nigeria: IJECS – IJENS.
- [4] Stevenson, W. D. Jr. 1984. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- [5] Weedy, B M; Cory, B J. 1998. *Electric Power Systems*. London: Wiley.