

## PENGARUH CAPACITOR BANK SWITCHING TERHADAP KUALITAS DAYA

### EFFECT OF CAPACITOR BANK SWITCHING ON POWER QUALITY

Emmy Hosea<sup>1</sup>, Ontoseno Penangsang<sup>2</sup>, Algavien Tinus<sup>3</sup>

<sup>1&3</sup>Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra, Surabaya

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro, ITS, Surabaya

<sup>1</sup>emmyho@.petra.ac.id, <sup>2</sup>ontosp@telkom.net, <sup>3</sup>algavien\_Tinus@yahoo.com

#### Abstrak

*Capacitor bank* merupakan peralatan yang mempunyai fungsi untuk memperbaiki *power factor*, mengeliminasi gangguan tegangan, dan mengontrol daya reaktif. Di dalam usaha untuk meningkatkan kualitas daya dengan menggunakan kapasitor bank, timbul masalah baru dalam pengoperasian *capacitor bank* yang dikenal dengan nama *capacitor bank switching*, yaitu timbulnya gejala tegangan *transient* yang tinggi (*transient overvoltages*). Paper ini memberikan hasil pengujian dan analisis simulasi *transient overvoltages* dengan menggunakan *software* Matlab berdasarkan data-data transmisi, seperti tegangan dan impedansi saluran yang didapat dari Gardu Induk Waru. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa *transient overvoltages* yang dihasilkan oleh pengoperasian *capacitor bank switching* pada sistem transmisi di Gardu Induk Waru dapat mencapai nilai tertinggi 1,74 pu pada sistem transmisi 150 kV dan 2,2 pu pada sistem transmisi 70 kV. Di samping itu, dapat dilihat juga bahwa *transient overvoltages* yang dihasilkan akan semakin meningkat apabila posisi *level* tegangannya semakin dekat dengan beban.

**Kata Kunci:** *Capacitor Bank, Switching Capacitor, Transient Overvoltages*

#### Abstract

*Capacitor bank* is a device that functions to improve the power factor, eliminate voltage disturbance and control the reactive power. In an effort to improve the power quality by using capacitor bank, new problems arise in operating it, known as capacitor bank switching, in which the symptoms of transient overvoltages emerge. This paper presents the results of transient overvoltages simulation using SIMULINK MATLAB software based on transmission data, such as voltage and impedance data obtained from the Waru Substation. The result shows that the transient overvoltages generated by the operation of the capacitor bank switching in the transmission system of Waru Substation can reach the highest value of 1.74pu on the 150kV and 2.2pu on the 70kV transmission system. It is also noticeable that the transient overvoltages produced will increase when the voltage level is closer to the load.

**Keywords:** *Switching Capacitor, Transient Overvoltage*

Tanggal Terima Naskah : 07 Juli 2017

Tanggal Persetujuan Naskah : 07 Agustus 2017

## 1. PENDAHULUAN

*Capacitor bank* adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas daya dengan cara menaikkan  $\text{Cos } \phi$ , mengeliminasi gangguan tegangan, dan mengontrol

daya reaktif. Penggunaan *capacitor bank* pada sistem distribusi listrik, dimana cara pengoperasiannya dikenal dengan nama *capacitor bank switching*, dapat menimbulkan masalah baru, yaitu mengakibatkan tegangan *transient* yang tinggi (*transient overvoltages*). Tegangan *transient* yang tinggi ini berbahaya dan dapat merusak peralatan pada sistem distribusi listrik PLN.

## 2. KAPASITOR DAYA DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK

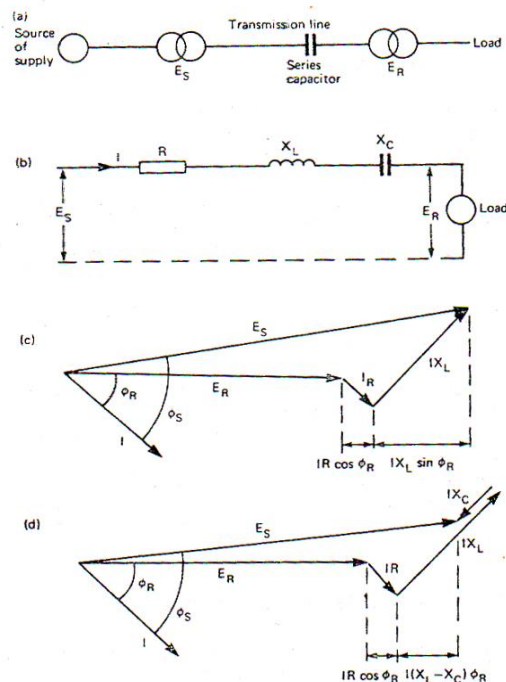
Pada dasarnya pemasangan kapasitor daya pada sistem transmisi dan distribusi mempunyai tujuan untuk memperbaiki faktor daya dan sistem regulasi tegangan pada sistem transmisi. Kapasitor daya juga dapat digunakan untuk filter harmonisa, proteksi terhadap petir, dan dapat juga digunakan sebagai generator impuls dan pembagi tegangan.

Pada jaringan distribusi, penggunaan kapasitor daya dapat digolongkan berdasarkan tegangan yang digunakan (*low voltage* dan *high voltage*) pemasangannya (kapasitor seri dan paralel), berdasarkan sistem aplikasinya (*open-rack design* dan *capacitor in pole-mounted hanger*), dan berdasarkan waktu kerjanya (*fixed capacitor* dan *switches capacitor*) [1]. Berdasarkan pemasangannya kapasitor daya dibagi menjadi dua:

### a. *Series capacitor* (kapasitor seri)

Dasar kerja dari suatu kapasitor seri adalah pemasangannya yang terhubung seri dengan sumber tegangan. Kapasitor seri digunakan sebagai kompensasi dari reaktansi jaringan [2]. Penggunaan kapasitor seri memiliki beberapa keuntungan:

1. Dapat mengatur regulasi tegangan secara otomatis.
2. Dapat meregulasi tegangan secara cepat atau seketika, karena dapat meredam *flickers* pada *supply* ketika arus melalui beban seperti pada saat terjadi busur api.
3. Dapat menolong untuk mengatasi dan mengontrol *system power-swing*.
4. Dapat mengurangi efek *transient* dan meningkatkan stabilitas sistem.
5. Dapat mengatur aliran daya pada jaringan sehingga daya yang disalurkan menjadi lebih efektif.



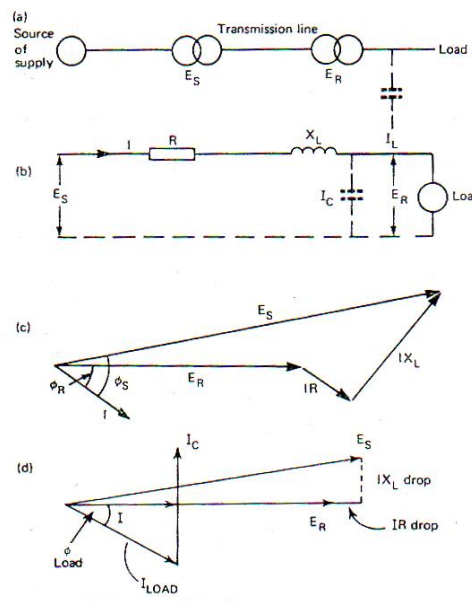
Gambar 1. Diagram Sistem Jaringan dengan Kapasitor Seri. (a) Sistem, (b) Rangkaian Sirkuit, (c) Diagram Phasor Tanpa Kapasitor Seri, (d) Diagram Phasor Dengan Kapasitor Seri [1]

Kapasitor seri umumnya tidak digunakan secara luas dalam saluran distribusi karena mempunyai sistem yang lebih kompleks. Biaya pemasangan kapasitor seri jauh lebih mahal daripada kapasitor paralel, dan umumnya kapasitor seri dirancang dengan kapasitas yang lebih besar dengan tujuan untuk mengantisipasi perkembangan beban untuk masa-masa yang akan datang [3].

b. *Shunt capacitor* (kapasitor paralel)

Prinsip kerja dari kapasitor paralel adalah pemasangannya yang dihubungkan paralel dengan sumber tegangan. Pada umumnya kapasitor paralel dipasang untuk memperbaiki faktor daya dan diletakkan dekat dengan beban. Manfaat penggunaan kapasitor paralel:

1. berkurangnya *voltage drop* di sepanjang saluran.
2. berkurangnya kebutuhan kVA dari catu daya sehingga kapasitas penyaluran daya lebih besar.
3. memperbaiki faktor daya di sepanjang saluran.

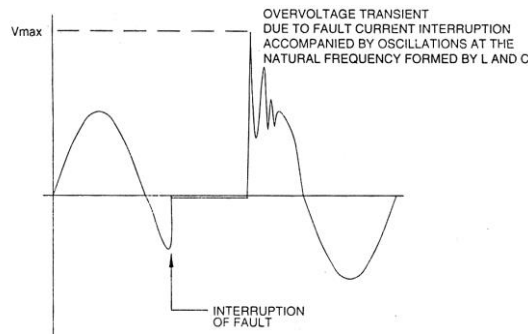


Gambar 2. Diagram Sistem Jaringan dengan Kapasitor Paralel (a) Sistem, (b) Rangkaian Sirkuit, (c) Diagram Phasor Tanpa Kapasitor paralel, (d) Diagram Phasor Dengan Kapasitor paralel [1]

### 3. SWITCHING KAPASITOR DAYA

*Capacitor bank* merupakan suatu komponen yang digunakan untuk memperbaiki kualitas daya dengan menaikkan  $\cos \phi$ , mengeliminasi gangguan *voltage*, dan mengontrol daya reaktif. Namun, dalam pengoperasiannya yang dikenal dengan nama *capacitor bank switching* dapat mengakibatkan dampak negatif pada kualitas daya, yaitu dapat mengakibatkan *transient overvoltage* yang jelas dapat merusak peralatan sistem distribusi listrik. Terjadinya *transient overvoltage* yang tajam ini diakibatkan oleh *short circuit* yang terjadi pada saat pelepasan muatan pada *capacitor*.

Pengoperasian *capacitor bank switching* biasanya terpasang pada *distribution feeder* atau penyulang distribusi dan biasanya memiliki *rating* kurang dari 1.800 KVAR, atau umumnya antara 300 sampai 1.200 KVAR. Selama terjadi perubahan tegangan yang disebabkan oleh *switching capacitor bank*, sistem akan menghasilkan *ripple effect*, yang akan beresilasi sampai mencapai keadaan *steady state*.



Gambar 3. *Transient Overvoltages* [4]

*Switching* pada *capacitor bank* selalu disertai oleh lonjakan arus yang dibatasi oleh impedansi dari *power system* dan resistansi dari jaringan. Terjadinya *transient overvoltage* diikuti oleh kenaikan tegangan (*voltage rise*) yang akan beresilasi dalam frekuensi yang ditentukan oleh induktansi dan kapasitansi dalam sirkuit (*LC circuit*) [5].

Kenaikan tegangan pada operasi *switching* dapat mencapai nilai 1,5 sampai 2 kali dari nilai nominal tegangan. Peralatan listrik hanya dapat bertahan sebentar bila mendapatkan besaran kenaikan tegangan seperti itu dan apabila terjadi berulang kali, maka isolasi dari peralatan akan melemah dan semakin besar kemungkinan terjadinya *breakdown*.

#### 4. Rangkaian Simulasi dengan Matlab

Untuk membuat rangkaian simulasi *transient overvoltages* pada kapasitor daya, digunakan data yang berasal dari Gardu Induk Waru. Pada Gardu Induk Waru terdapat sistem transmisi 150 kV, 70 kV, dan sistem distribusi 20 kV. Untuk sistem 150 kV dan 70 kV terdapat dua rel *busbar* utama (*Bus A* dan *Bus B*) yang digunakan untuk menerima daya dari sumber dan menyalurkan daya ke beban. Data-data ini akan digunakan dalam pengisian data pada simulasi dengan menggunakan Simulink Matlab.

##### a. Transformator Daya

Terdiri dari tujuh buah transformator daya dengan spesifikasi sebagai berikut.

- 2 trafo dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Trafo 1 dan 2

| No. | Spesifikasi    | Trafo 1 & 2 |
|-----|----------------|-------------|
| 1.  | Tegangan       | 150/70 KV   |
| 2.  | Arus Primer    | 161 Amp     |
| 3.  | Arus Sekunder  | 322 Amp     |
| 4.  | Vektor Grup    | Ynyn0(d1)   |
| 5.  | Impedansi      | 9,8 %       |
| 6.  | Kapasitas Daya | 39 MVA      |

- 2 trafo dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2. Spesifikasi Trafo 3 dan 4

| No. | Spesifikasi    | Trafo 3&4 |
|-----|----------------|-----------|
| 1.  | Tegangan       | 150/20 KV |
| 2.  | Arus Primer    | 230,9 Amp |
| 3.  | Arus Sekunder  | 1732 Amp  |
| 4.  | Vektor Grup    | Ynyn0(d1) |
| 5.  | Impedansi      | 12,5 %    |
| 6.  | Kapasitas Daya | 60 MVA    |

- 2 trafo dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3. Spesifikasi Trafo 5 dan 6

| No. | Spesifikasi    | Trafo 5&6  |
|-----|----------------|------------|
| 1.  | Tegangan       | 150/20 KV  |
| 2.  | Arus Primer    | 192,45 Amp |
| 3.  | Arus Sekunder  | 1443,4 Amp |
| 4.  | Vektor Grup    | Ynyn0 (d1) |
| 5.  | Impedansi      | 12.17 %    |
| 6.  | Kapasitas Daya | 50 MVA     |

- 1 trafo dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 4. Spesifikasi Trafo 7

| No. | Spesifikasi    | Trafo 7   |
|-----|----------------|-----------|
| 1.  | Tegangan       | 150/20 KV |
| 2.  | Arus Primer    | 115,1 Amp |
| 3.  | Arus Sekunder  | 866 Amp   |
| 4.  | Vektor Grup    | Ynyn0(d1) |
| 5.  | Impedansi      | 12,38 %   |
| 6.  | Kapasitas Daya | 30 VA     |

- b. Data *Transmission Line* 150/70 kV

Tabel 5. Data Transmission Line

| No. | T.L. Bay               | Type    | Luas (mm <sup>2</sup> ) | Panjang (km) |
|-----|------------------------|---------|-------------------------|--------------|
| 1.  | Sawah-an-1             | ACSR    | 2 x 330                 | 10,73        |
| 2.  | Sawah-an-2             | ACSR    | 2 x 330                 | 10,73        |
| 3.  | Ispat Indo-1           | ACSR-AW | 330                     | 1,20         |
| 4.  | Ispat Indo-2           | ACSR-AW | 330                     | 1,20         |
| 5.  | Buduran-1 (Ex. Bangil) | ACSR    | 330                     | 21,75        |
| 6.  | Buduran-2              | ACSR    | 330                     | 7,68         |
| 7.  | Karang Pilang-1        | ACSR    | 2 x 330                 | 10,74        |
| 8.  | Karang Pilang-2        | ACSR    | 2 x 330                 | 10,74        |
| 9.  | Rungkut-1              | ACSR    | 2 x 330                 | 4,76         |
| 10. | Rungkut-2              | ACSR    | 2 x 330                 | 4,76         |
| 11. | Darmo Grand-1          | ACSR    | 340                     | 12,73        |
| 12. | Darmo Grand-2          | ACSR    | 340                     | 12,73        |
| 13. | Gresik-1               | ACSR    | 2 x 330                 | 24,70        |
| 14. | Gresik-2               | ACSR    | 2 x 330                 | 24,70        |
| 15. | TL.70kV Maspion        | ACSR    | 160                     | 4,66         |
| 16. | TL.70kV Buduran        | ACSR    | 160                     | 7,56         |

## c. Data Beban Puncak Transmisi

Tabel 6. Data Beban Puncak Transmisi

| No. | Gardu Induk - Jurusan  | Beban Tertinggi |     |     |      |
|-----|------------------------|-----------------|-----|-----|------|
|     |                        | kV              | Amp | MW  | MVAR |
| 1.  | Sawah-an I - Waru      | 150             | 560 | 140 | 40   |
| 2.  | Sawah-an II - Waru     | 150             | 560 | 140 | 40   |
| 3.  | Karangpilang I - Waru  | 150             | 440 | 100 | 55   |
| 4.  | Karangpilang II - Waru | 150             | 440 | 100 | 55   |
| 5.  | PLTU/G Gresik I-Waru   | 150             | 440 | 100 | 20   |
| 6.  | PLTU/G Gresik II-Waru  | 150             | 440 | 100 | 18   |
| 7.  | Darmo Grand I - Waru   | 150             | 340 | 85  | 20   |
| 8.  | Darmo Grand II - Waru  | 150             | 340 | 85  | 20   |
| 9.  | Waru - Rungkut I       | 150             | 800 | 200 | 60   |
| 10. | Waru - Rungkut II      | 150             | 800 | 200 | 60   |
| 11. | Waru - Buduran I       | 150             | 215 | 50  | 25   |
| 12. | Waru - Buduran II      | 150             | 480 | 110 | 60   |
| 13. | Waru - ISPAT INDO I    | 150             | 345 | 80  | 40   |
| 14. | Waru - ISPAT INDO II   | 150             | 430 | 100 | 50   |
| 15. | Waru - Maspion         | 70              | 280 | 28  | 12   |
| 16. | Waru - Buduran         | 70              | 80  | 8   | 5    |

d. Data Beban Puncak Transformator

Tabel 7. Data Beban Puncak Transformator

| No. | Trafo GI Waru | Beban Tertinggi |    |      |
|-----|---------------|-----------------|----|------|
|     |               | Amp             | MW | MVAR |
| 1.  | Trafo I       | 170             | 18 | 8    |
| 2.  | Trafo II      | 170             | 18 | 8    |
| 3.  | Trafo III     | 1156            | 35 | 13   |
| 4.  | Trafo IV      | 950             | 21 | 7    |
| 5.  | Trafo V       | 1280            | 38 | 17   |
| 6.  | Trafo VI      | 680             | 25 | 10   |
| 7.  | Trafo VII     | 455             | 14 | 7    |

Berdasarkan data beban puncak transmisi dan transformator maka dapat ditentukan kapasitas *capacitor bank* yang digunakan, yaitu:

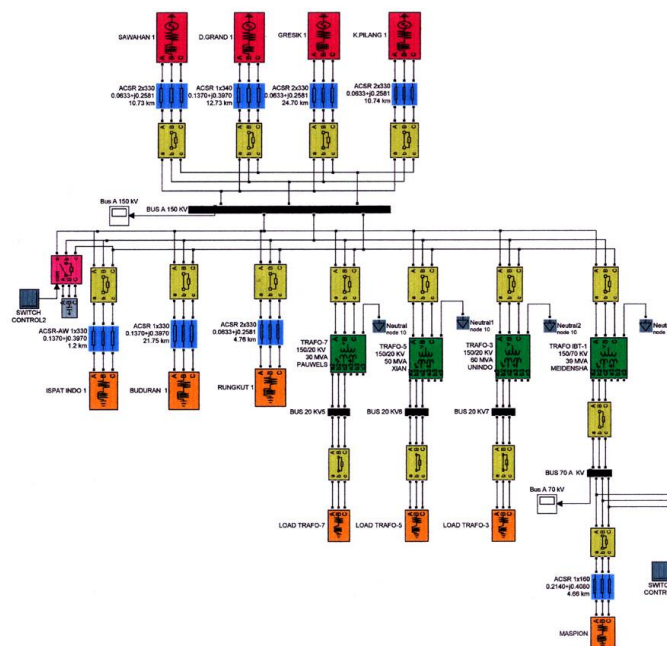
Tabel 8. *Capacitor Bank*

| No. | Rel Busbar   | Kapasitor (MVAR) |
|-----|--------------|------------------|
| 1   | Bus A 150 kV | 300              |
| 2   | Bus B 150 kV | 310              |
| 3   | Bus A 70 kV  | 12               |
| 4   | Bus B 70 kV  | 12               |

Dari data yang diperoleh tersebut dapat dibuat rangkaian simulasi dengan menggunakan Simulink Matlab sebagai berikut.

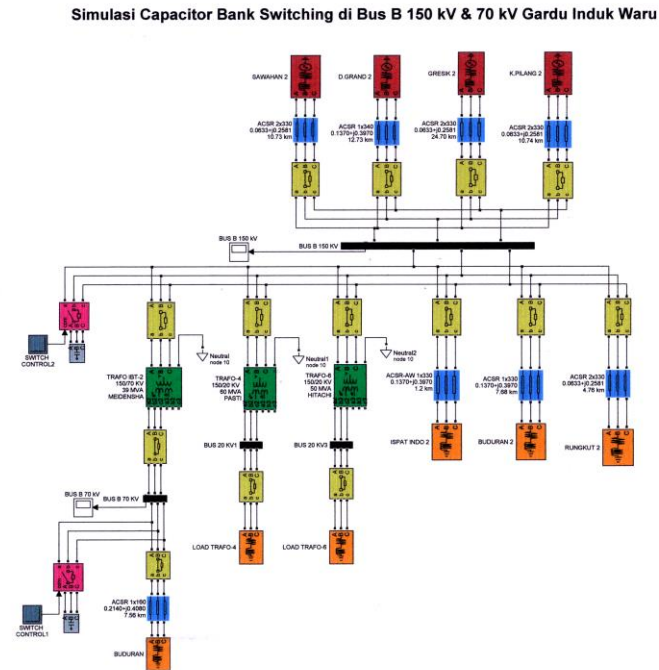
1. Rangkaian simulasi *capacitor bank switching* di bus A 150 kV dan 70 kV.

Simulasi *Capacitor Bank Switching* di Bus A 150 kV dan 70 kV Gardu Induk Waru



Gambar 4. Rangkaian simulasi *capacitor bank switching* di bus A 150 kV dan 70 kV

2. Rangkaian simulasi *capacitor bank switching* di bus B 150 kV dan 70 kV.



Gambar 5. Rangkaian simulasi *capacitor bank switching* di bus B 150 kV dan 70 kV

**5. SIMULASI CAPACITOR BANK SWITCHING DI GARDU INDUK WARU**

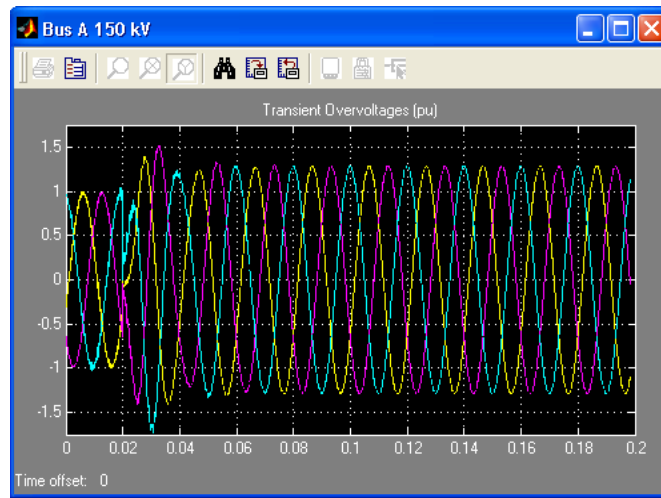
Simulasi dalam program ini dibagi menjadi empat skenario, yaitu:

- Simulasi *Capacitor Bank Switching* dengan kapasitor yang terpasang pada Bus A 150 kV dan Bus A 70 kV, di mana kapasitor di Bus A 150 kV operasi lebih dahulu (skenario I).
- Simulasi *Capacitor Bank Switching* dengan kapasitor yang terpasang pada Bus B 150 kV dan Bus B 70 kV, di mana kapasitor di Bus B 150 kV operasi lebih dahulu (skenario II)
- Simulasi *Capacitor Bank Switching* dengan kapasitor yang terpasang pada Bus A 150 kV dan Bus A 70 kV, di mana kapasitor di Bus A 70 kV operasi lebih dahulu (skenario III)
- Simulasi *Capacitor Bank Switching* dengan kapasitor yang terpasang pada Bus B 150 kV dan Bus B 70 kV, di mana kapasitor di Bus B 70 kV operasi lebih dahulu (skenario IV)

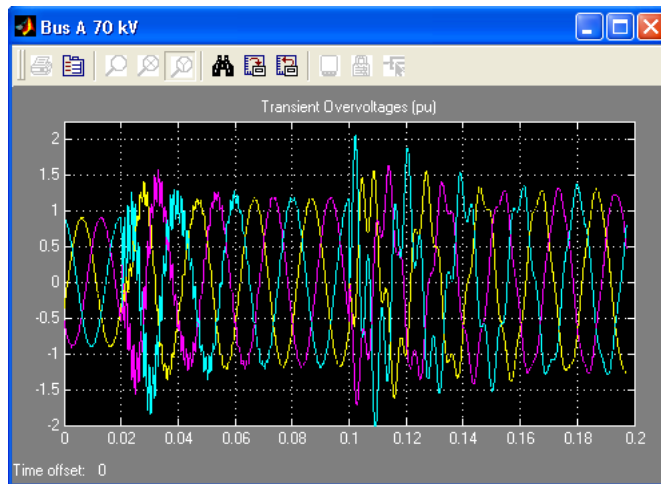
Berikut adalah tampilan pada Matlab:



- Skenario I

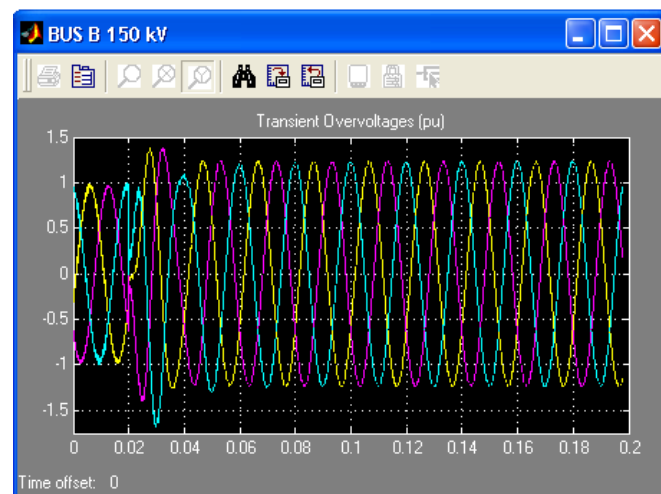


Gambar 6. Gelombang di *Bus A* 150 kV

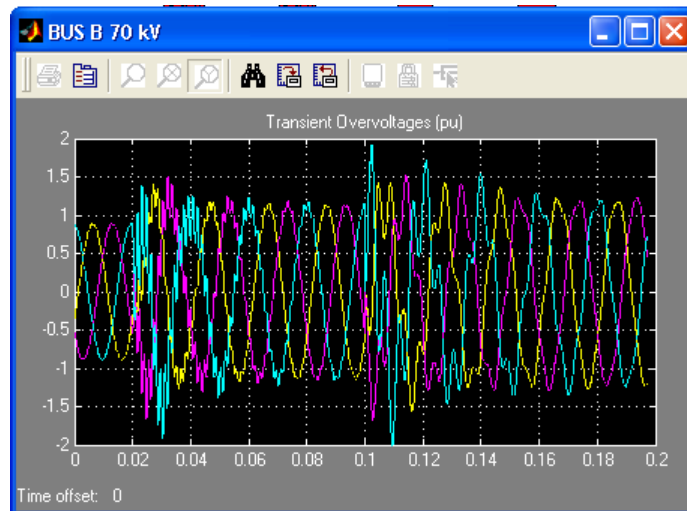


Gambar 7. Gelombang di *Bus A* 70 kV

- Skenario II



Gambar 8. Gelombang di *Bus B* 150 kV

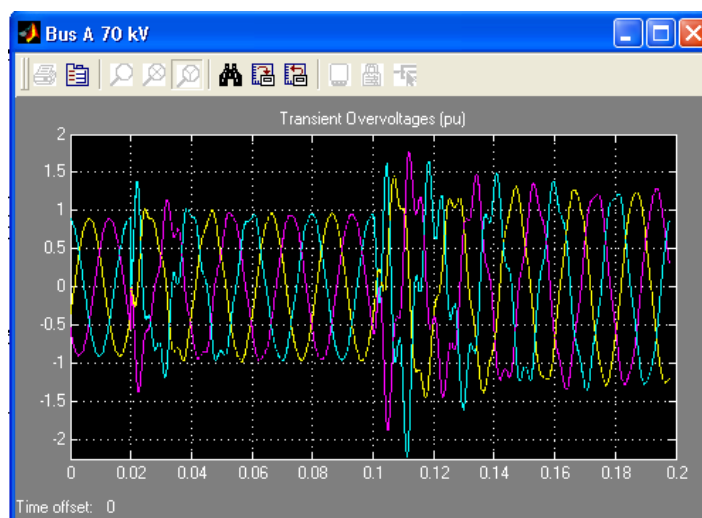


Gambar 9. Gelombang di *Bus B* 70 kV

- Skenario III

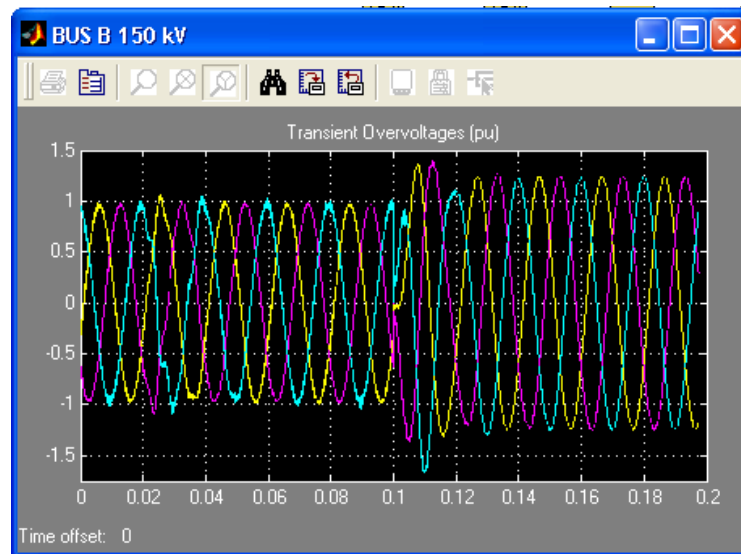


Gambar 10. Gelombang di *Bus A* 150 kV



Gambar 11. Gelombang pada *Bus A* 70 kV

- Skenario IV



Gambar 12. Gelombang di *Bus B 150 kV*



Gambar 13. Gelombang di *Bus B 70 kV*

## 6. HASIL DAN ANALISIS SIMULASI DARI SETIAP SKENARIO

Dari hasil simulasi gelombang didapat:

- *Bus A 150 kV* dan *Bus A 70 kV* (skenario I), *transient overvoltages* tertinggi: 1,74 pu (150 kV) dan 2,07 pu (70 kV)
- *Bus B 150 kV* dan *Bus B 70 kV* (skenario II), *transient overvoltages* tertinggi: 1,68 pu (150 kV) dan 2,0 pu (70 kV)

- Bus A 150 kV dan Bus A 70 kV (skenario III), *transient overvoltages* tertinggi: 1,73 pu (150 kV) dan 2,2 pu (70 kV)
- Bus B 150 kV dan Bus B 70 kV (skenario IV), *transient overvoltages* tertinggi: 1,68 pu (150 kV) dan 2,0 pu (70 kV)

Berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi untuk semua skenario tersebut ditunjukkan bahwa pemasangan *capacitor bank* pada sistem untuk memperbaiki  $\cos \phi$  justru dapat mengakibatkan *transient overvoltages*. Selain itu, *transient overvoltages* yang ditimbulkan cukup beragam tergantung kepada sistemnya. *Transient overvoltages* yang terjadi pada sisi tegangan yang lebih rendah (70 kV) cenderung lebih tinggi dan banyak *ripple*-nya dari pada sisi tegangan yang lebih tinggi (150 kV). Hal ini disebabkan oleh letaknya yang semakin dekat dengan beban maka *transient* yang dihasilkan akan semakin signifikan. Secara umum, *transient over-voltages* yang dihasilkan pada sistem transmisi utama (150 kV) tidak lebih dari 2 pu.

Dari hasil simulasi diketahui, semakin dekat *level* tegangannya dengan beban, maka *transient overvoltages* yang dihasilkan akan meningkat karena impedansi sepanjang jaringannya juga bertambah. Selain itu, dari hasil simulasi juga diketahui bahwa pengoperasian kapasitor pada tegangan yang lebih rendah (70 kV) tidak menghasilkan *transient overvoltages* yang signifikan terhadap tegangan di atasnya (150 kV).

Sebaliknya, pengoperasian kapa-sitor pada tegangan yang lebih tinggi (150 kV) dapat menghasilkan *transient overvoltages* pada tegangan yang lebih rendah (70 kV). Hal ini disebabkan oleh aliran arus yang selalu mengalir dari sumber menuju ke beban.

## 7. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi *Capacitor Bank Switching* di Gardu Induk Waru dengan menggunakan Simulink Matlab, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Besarnya *transient overvoltages* tergantung dari sistemnya. Pada hasil simulasi ditunjukkan bahwa *transient overvoltages* pada Bus 70 kV cenderung lebih besar dan lebih banyak *ripple*-nya dibandingkan *transient overvoltages* pada Bus 150 kV. Hal ini disebabkan oleh posisi *level* tegangannya yang semakin dekat dengan beban.
- b. Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa pengoperasian kapasitor pada tegangan yang lebih rendah (70 kV) tidak menghasilkan *transient overvoltages* yang signifikan terhadap tegangan di atasnya (150 kV). Sebaliknya, pengoperasian kapasitor pada tegangan yang lebih tinggi (150 kV) dapat menghasilkan *transient overvoltages* pada tegangan yang lebih rendah (70 kV).
- c. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa *transient overvoltages* yang dihasilkan oleh pengoperasian *capacitor bank switching* pada sistem transmisi di Gardu Induk Waru dapat mencapai nilai tertinggi 1,74 pu pada sistem transmisi 150 kV dan 2,2 pu pada sistem transmisi 70 kV.

## REFERENSI

- [1]. Ashish Chandra, Taru Agarwal. "Capacitor Bank Designing for Power Factor Improvement". International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Volume 4, Issue 8, August 2014. ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal..
- [2]. Dugan, Roger C. 2012. "Electrical Power System Quality". New York: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [3]. Longland, T., et al. 2007. "Power Capacitor Handbook". London: Butterworth & Co (Publishers) Ltd.

- [4]. Marx, Thomas. 2007. "The Why And How Of Power Capacitor Switching". St. Cleveland: Fisher Pierce Publisher.
- [5]. Tagare, D.M. 2004. "Reactive Power Mana-gement". New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.

