

# Skema Proteksi Resonansi Tegangan Lebih Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV

Imam Ghozali<sup>1</sup>, Mochammad Facta<sup>2</sup>, Abdul Syakur<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Magister Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia (tel. 024-7460056; email: <sup>1</sup>imamghozali.jmk08@gmail.com, <sup>2</sup>facta@elektro.undip.ac.id, <sup>3</sup>syakur@elektro.undip.ac.id)

[Diterima: 31 Mei 2023, Direvisi: 12 September 2023]

Corresponding Author: Imam Ghozali

**INTISARI** — Pemasangan reaktor *shunt* pada ujung saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) rangkaian ganda 500 kV seringkali dilakukan untuk membantu mengatasi kenaikan tegangan akibat kapasitans saluran yang panjang. Namun, permasalahan tegangan masih mungkin terjadi, khususnya ketika proses injeksi tegangan di saluran transmisi baru yang telah terpasang, akibat adanya induksi tegangan dan penguatan parameter dari rangkaian lain di saluran yang sama yang telah terinjeksi terlebih dahulu. Permasalahan munculnya tegangan lebih ini menjadi makin pelik karena saluran dan reaktor *shunt* telah selesai terpasang, sehingga panjang saluran dan kapasitans reaktor *shunt* tidak mungkin diubah. Fenomena tegangan lebih dalam penelitian ini terjadi ketika satu rangkaian di saluran transmisi belum diinjeksi, tetapi reaktor *shunt* telah tersambung, sehingga saluran tersebut mendapat induksi dan penguatan dari rangkaian lain karena di saat yang sama rangkaian yang kedua telah terinjeksi tegangan kerja. Dalam upaya mengatasi kondisi tegangan lebih tersebut, dalam makalah ini dilakukan perubahan skenario manuver injeksi tegangan ke saluran, perubahan skema proteksi jika terjadi gangguan fase ke tanah, dan penambahan relai tegangan lebih. Perubahan skenario manuver injeksi tegangan dapat mengurangi tegangan lebih yang terjadi pada saluran yang belum terinjeksi tegangan hingga 31,9 kVp. Perubahan skema proteksi saat terjadi gangguan fase ke tanah dengan memerintahkan pembukaan *circuit breaker* (CB) reaktor *shunt* dapat menghindarkan terjadinya kenaikan tegangan pada fase yang tidak terganggu. Penambahan relai tegangan dilakukan sebagai antisipasi terjadinya tegangan lebih ketika ada gangguan pada saluran dan kondisi CB reaktor *shunt* tidak mampu membuka akibat gangguan internal.

**KATA KUNCI** — Reaktor *Shunt*, Rangkaian Ganda, Tegangan Lebih, Skema Proteksi, Saluran Transmisi Ekstra Tinggi.

## I. PENDAHULUAN

Tegangan lebih yang terjadi pada saluran transmisi tegangan ekstra tinggi merupakan fenomena yang berbahaya karena dapat merusak isolasi peralatan listrik yang terhubung akibat tegangan yang melebihi kapasitas kemampuan peralatan [1], [2]. Selain akibat sambaran petir, tegangan lebih pada saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) biasa terjadi pada saat proses *switching*, sehingga harus diantisipasi agar kestabilan penyaluran tenaga listrik terjaga [3]–[5]. Fenomena kenaikan tegangan dalam SUTET rangkaian ganda 500 kV juga terjadi akibat pengaruh kapasitans saluran panjang, sehingga menjadi alasan dilakukannya pemasangan reaktor *shunt* pada kedua ujung saluran [6]–[8]. Pemasangan reaktor *shunt* pada SUTET rangkaian ganda dengan saluran panjang untuk mengurangi permasalahan tegangan lebih akibat kapasitans saluran banyak dipilih dan digunakan pada saluran transmisi baru (ketika proses pembangunan) atau saluran transmisi lama. Namun, pemasangan reaktor *shunt* pada saluran rangkaian ganda menimbulkan sebuah fenomena tegangan lebih yang lain di kedua ujung saluran terpasang reaktor *shunt* [9]–[11]. Tegangan lebih terjadi pada saat salah satu saluran dalam kondisi terbuka dan posisi reaktor *shunt* dalam kondisi masuk. Di saat yang sama, saluran kedua masih dalam kondisi bertegangan [12]–[14].

Dalam kurun waktu lima tahun terakhir, beberapa peneliti telah melakukan penelitian berkaitan dengan fenomena tegangan lebih yang terjadi pada sistem penyaluran tenaga listrik dan melakukan beberapa upaya untuk menekan maupun mengurangi tegangan lebih yang terjadi. Di antara upaya tersebut adalah dengan melakukan penambahan peralatan *surge arrester* dan melakukan langkah pengontrolan pada *doubly-fed induction generator* (DFIG) dan *point of common*

*coupling* (PCC) selama gangguan pada *grid* [15], [16]. Tegangan lebih juga dapat dikurangi dengan mengganti kontak *disconnect switch* (DS) dengan memasang *closing resistance* pada DS [17]. Penerapan skema pembukaan tiga fase pada reaktor dilakukan untuk melakukan mitigasi terhadap resonansi tegangan lebih [18]–[20]. Pengembangan desain proteksi petir juga telah dilakukan untuk mengantisipasi tegangan lebih [21], [22]. Penelitian resonansi tegangan lebih pada saluran transmisi menghasilkan mekanisme memperkecil tegangan lebih akibat sambaran petir dengan analisis tegangan tunak dan penyederhanaan rangkaian resonansi [23]–[25].

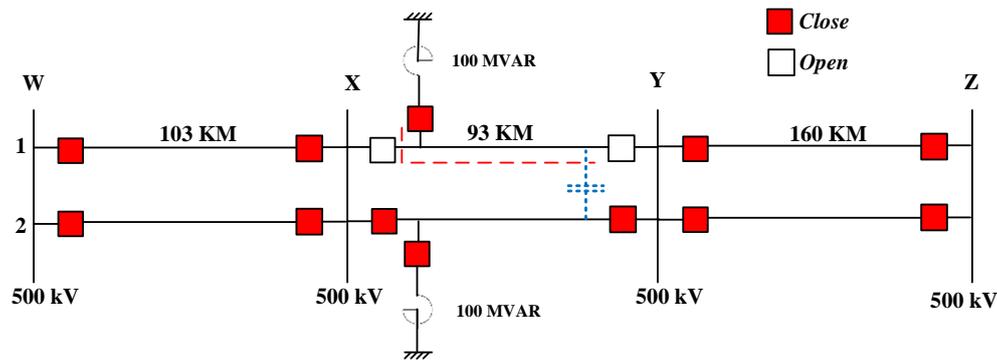
Reaktor *shunt* sangat efektif dalam mengurangi tegangan lebih selama proses pembebanan atau pada saat pemberian tegangan. Di sisi lain, pemasangan reaktor *shunt* aktualnya dapat meningkatkan tegangan induksi pada saluran yang tidak bertegangan apabila terjadi kondisi-kondisi berikut [26].

- Dalam saluran rangkaian tunggal pada saat menggunakan pola *single pole auto reclose* (SPAR), resonansi seri akan terjadi.
- Dalam saluran rangkaian ganda pada saat hanya salah satu saluran yang bertegangan, resonansi paralel akan terjadi.

Resonansi tegangan lebih muncul apabila nilai *shunt compensation degree* tinggi. Perhitungan nilai persentase *compensation degree* diperoleh dari perbandingan nilai *shunt* kompensasi reaktor dengan *positive sequence susceptance* saluran transmisi [27]. Pada umumnya, nilai *compensation degree* berada pada rentang 60% sampai 80% [28].

Beberapa alternatif solusi telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dalam mengatasi permasalahan pada saat kondisi resonansi terjadi pada saluran, antara lain sebagai berikut [29].

- Membuat transposisi lengkap pada saluran transmisi.



Gambar 1. Diagram satu garis saluran transmisi yang diteliti saat terjadi tegangan lebih pada saluran X ke Y.

- Membuat skema *ungrounding* pada saluran netral reaktor.
- Memasang resistor antara saluran tanah dan saluran netral reaktor.
- Memasang sebuah reaktor (yang dipasang langsung atau digandeng) antara tanah dan netral reaktor.
- Mengganti *disconnecting switch earth* (DSE) dengan *circuit breaker* (CB) karena tegangan induksi pada tegangan tinggi berbahaya bagi DSE sebab menimbulkan *arching* antara *switch* terminal DSE.
- Melakukan perubahan konfigurasi reaktor.

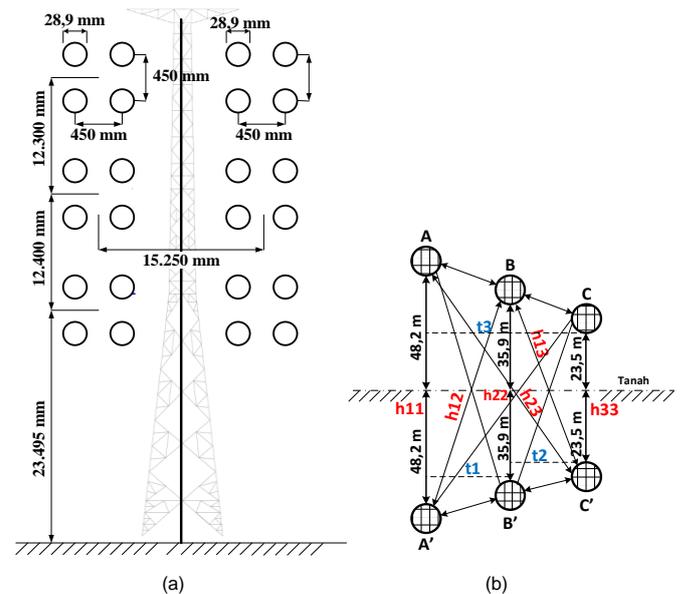
Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis penyebab terjadinya tegangan lebih saluran rangkaian ganda ketika salah satu saluran telah terinjeksi tegangan, kemudian terjadi kondisi tegangan lebih pada saluran yang tidak bertegangan saat reaktor dimasukkan ke dalam sistem. Alternatif solusi yang dilakukan dalam penelitian ini belum pernah dilakukan pada penelitian sebelumnya, yaitu sebagai berikut.

- Melakukan proses perubahan skenario manuver saat pemberian tegangan, yang bertujuan untuk menambahkan panjang saluran yang dapat mencegah resonansi tegangan lebih terjadi.
- Perubahan desain skema proteksi pada saat terjadi gangguan satu fase sebagai langkah untuk mengamankan fase yang tidak terganggu efek resonansi tegangan lebih.
- Penambahan relai tegangan lebih pada saluran sebagai langkah antisipasi saat tegangan lebih muncul akibat gangguan pada saluran dengan kondisi CB reaktor gagal membuka.

## II. MATERIAL

### A. OVERVIEW SISTEM

Gambar 1 merupakan diagram satu garis yang diteliti pada saat terjadinya fenomena tegangan lebih. Diagram satu garis tersebut terdiri atas empat buah saluran transmisi rangkaian ganda yang menghubungkan empat gardu induk tegangan ekstra tinggi (GITET) 500 kV, yaitu GITET W, X, Y, dan Z. Panjang saluran dari GITET W ke GITET X adalah 103 km, panjang saluran dari GITET X ke GITET Y adalah 93 km, dan panjang saluran dari GITET Y ke GITET Z adalah 160 km. Pada saluran transmisi rangkaian ganda X ke Y terpasang reaktor *shunt* berkapasitansi 100 MVAR dengan tegangan 500 kV. Kondisi awal CB di GITET X dan GITET Y adalah pada posisi terbuka, sebelum dilakukan pemberian tegangan pada saluran 1, sedangkan saluran 2 sudah dalam posisi terinjeksi tegangan.



Gambar 2. Data konduktor dan saluran. (a) Geometri tower, (b) penyederhanaan kapasitas saluran.

Data geometri tower dan konduktor pada Gambar 2(a) menunjukkan urutan bundel konduktor tiga fase vertikal, dengan masing-masing fase terdiri atas empat bundel konduktor (*quadrauple*). Jarak antara fase bawah dengan tanah adalah 23,49 m, jarak antara fase tengah dengan tanah adalah 35,89 m, dan jarak antara fase atas dengan tanah adalah 48,19 m. Gambar 2(b) merupakan gambar penyederhanaan jarak konduktor antar fase untuk mempermudah perhitungan kapasitas saluran transmisi tiga fase.

### B. PROSES TERJADINYA TEGANGAN LEBIH SAAT PROSES PEMBERIAN TEGANGAN

Dalam Gambar 1, fenomena tegangan lebih terjadi pada saat proses *energize* SUTET 500 kV saluran ganda dari GITET X ke GITET Y. Terjadi kenaikan tegangan di atas batas normal operasi hingga mencapai 584,93 kV pada saluran 1 ketika CB reaktor *shunt* di saluran 1 dimasukkan, padahal kondisi saluran 1 tersebut belum bertegangan. Hanya saja, saluran 2 sudah dalam kondisi bertegangan dengan CB reaktor *shunt* sudah masuk ke dalam sistem. Peristiwa kenaikan tegangan di atas batas normal operasi juga terjadi pada saluran 2 ketika CB reaktor *shunt* di saluran 2 dimasukkan, padahal kondisi saluran 2 tersebut belum bertegangan dan di saat yang sama kondisi saluran 1 sudah bertegangan, dengan CB reaktor *shunt* sudah masuk ke dalam sistem.

Gambar 3 memperlihatkan rekaman *digital fault recorder* (DFR). Dari Gambar 3(a), terlihat bahwa tegangan lebih pada



Gambar 3. Rekaman DFR, (a) saluran 1 dalam kondisi belum terinjeksi tegangan, (b) saluran 2 dalam kondisi belum terinjeksi tegangan.

saluran yang belum terinjeksi tegangan (saluran 1) sebesar 584,93 kVp ketika saluran lainnya (saluran 2) dalam kondisi terinjeksi tegangan.

Gambar 3(b) menunjukkan munculnya tegangan lebih pada saluran yang belum terinjeksi tegangan (saluran 2) sebesar 584,93 kVp ketika saluran lainnya (saluran 1) dalam kondisi terinjeksi tegangan.

### III. METODOLOGI

Dalam penelitian ini, pengukuran dan analisis untuk mengetahui nilai tegangan lebih dilakukan dengan langkah-langkah berikut.

Langkah pertama adalah melakukan analisis perhitungan kapasitans saluran. Persamaan (1) merupakan perhitungan nilai *compensation degree* ( $k$ ).

$$k = \frac{B_L}{B_C} = \frac{\frac{1}{(\omega L)}}{(\omega C_+)} = \frac{1}{\omega^2 L \cdot (C_{pg} + 3 \cdot C_{pp})} \quad (1)$$

dengan  $C_+$  adalah kapasitans urutan positif,  $C_{pg}$  adalah kapasitans saluran terhadap tanah,  $C_{pp}$  merupakan kapasitans saluran antarfasa dalam satuan F/m, dan  $L$  adalah induktans dalam satuan H. Sementara itu, nilai kapasitans saluran transmisi dapat diperoleh dengan menggunakan (2) dan (3).

$$C_{pg} = \frac{2\pi\epsilon_0}{e_{\log}\left[\frac{D_{eq}}{r}\right] - e_{\log}\left[\frac{D_{AB'}D_{BC'}D_{CA'}}{D_{AA'}D_{BB'}D_{CC'}}\right]^{\frac{1}{3}}} \quad (2)$$

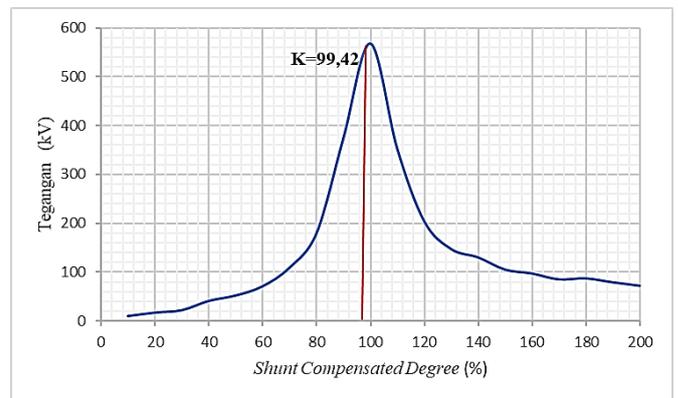
$$C_{pp} = \frac{C_{pg}}{2} \quad (3)$$

dengan  $D_{eq}$  adalah jarak antarsubkonduktor,  $D_{AB'}D_{BC'}D_{CA'}$  adalah jarak konduktor antarfasa, dan  $r$  adalah jari-jari konduktor *bundle*. Berdasarkan (1) dan Gambar 2(b), dihitung nilai kapasitans saluran ke tanah ( $C_{pg}$ ) dan nilai kapasitans antafasa ( $C_{pp}$ ), sehingga diperoleh hasil sebagai berikut.

$$C_{pg} = \frac{2 \times 3,14 \times 8,85 \times 10^{-12}}{e_{\log}\left[\frac{0,045}{0,0109}\right] - e_{\log}\left[\frac{118,94 \times 84 \times 101,4}{96,4 \times 71,8 \times 47}\right]^{\frac{1}{3}}} = 1,66 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

$$C_{pp} = \frac{C_N}{2} = 0,83 \times 10^{-11} \text{ F/m.}$$

Dari hasil perhitungan di atas, diperoleh nilai kapasitans saluran fase ke tanah sebesar  $1,66 \times 10^{-11} \text{ F/m}$  dan kapasitans saluran antarfasa sebesar  $0,83 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ , yang merupakan saluran tranmisi X ke Y dengan panjang 93 km. Setelah diperoleh nilai kapasitans saluran, dilakukan perhitungan nilai *shunt compensation degree* ( $k$ ) dengan hasil sebagai berikut.



Gambar 4. Grafik *shunt compensated degree* pada saluran X ke Z dengan perubahan nilai  $k$  dari 10%-200%.

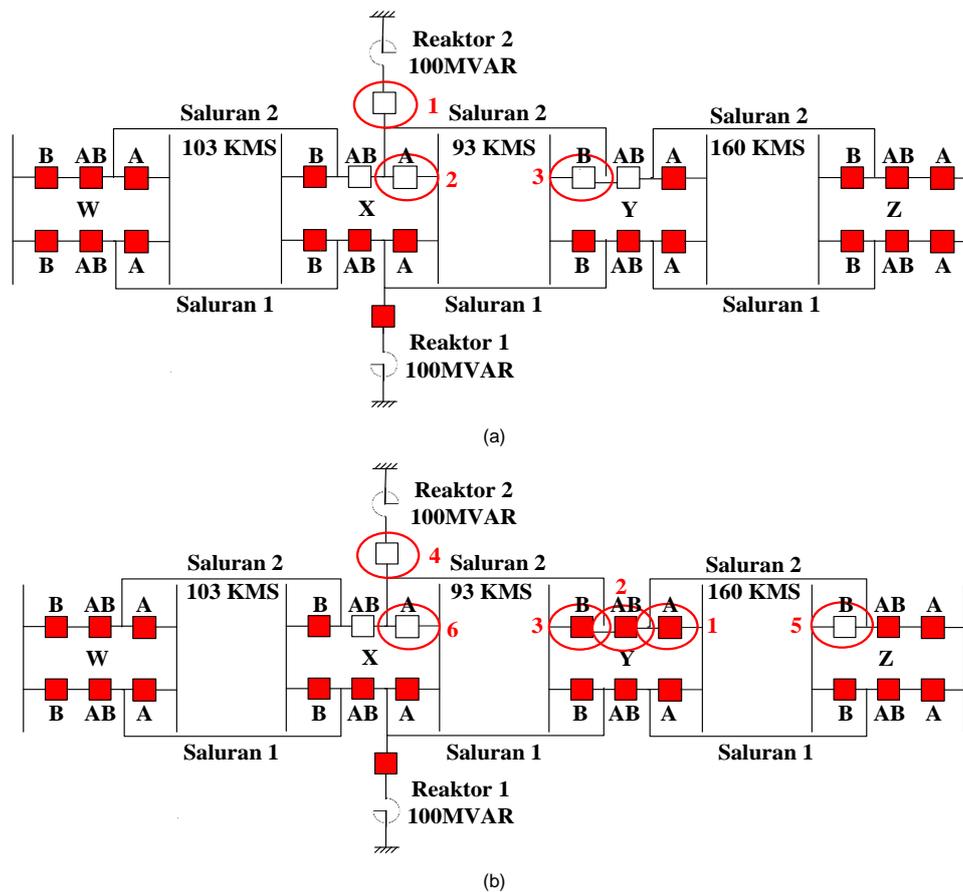
$$k = \frac{1}{\omega^2 L \cdot (C_{pg} + 3 \cdot C_{pp})}$$

$$k = \frac{1}{(2,3,14,50)^2 \times 2,64 \times (1,66 + 3 \times 0,83) \times 10^{-11} \times 93000}$$

$$k = 0,9942 = 99,42\%.$$

Nilai *shunt compensation degree* ( $k$ ) yang diperoleh setelah data reaktor *shunt* dan nilai kapasitans saluran dimasukkan adalah 99,42%. Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai *shunt compensation degree* ( $k$ ) saluran yang diteliti berada pada puncak resonansi tegangan lebih ketika diubah-ubah dari 10% hingga 200%. Hal ini dapat berpotensi menimbulkan resonansi tegangan lebih pada saluran.

Langkah kedua adalah membuat pemodelan konfigurasi *tower* 500 kV dan *coupling* antarsirkuit dan antarfasa dari saluran transmisi W – X – Y – Z dalam perangkat lunak Digsilent Power Factory berdasarkan data lapangan. Kemudian, langkah ketiga adalah melakukan validasi model simulasi terhadap data rekaman gangguan saat terjadinya tegangan lebih pada saluran 1 dengan kondisi saluran 2 terinjeksi tegangan dengan posisi reaktor masuk sistem. Perbandingan validasi dari rekaman DFR dengan hasil simulasi menunjukkan hasil yang identik. Dari hasil pengamatan pada DFR, tampak bahwa tegangan induksi sebesar 25,36 kVp, sedangkan tegangan induksi hasil simulasi sebesar 28,6 kVp sebelum CB reaktor saluran 1 dimasukkan. Selanjutnya, setelah CB reaktor ditutup, tegangan hasil simulasi pada saluran 1 sebesar 583,57 kVp. Hal ini sesuai dengan rekaman DFR untuk saluran 1, yaitu sebesar 584 kVp.



**Gambar 5.** Diagram satu garis, (a) proses pemberian tegangan sesuai prosedur awal, (b) perubahan urutan manuver proses pemberian tegangan.

Langkah keempat adalah melakukan validasi model simulasi terhadap data rekaman gangguan saat terjadi tegangan lebih pada saluran 2 dengan kondisi saluran 1 terinjeksi tegangan dengan posisi reaktor masuk sistem. Perbandingan validasi dari rekaman DFR dengan hasil simulasi memberikan hasil yang identik. Dari hasil pengamatan pada DFR, diperoleh tegangan induksi sebesar 25,03 kVp, sedangkan tegangan induksi hasil simulasi sebesar 28,6 kVp sebelum CB reaktor saluran 2 dimasukkan. Selanjutnya, setelah CB reaktor ditutup, tegangan hasil simulasi pada saluran 2 adalah 546,46 kVp, yang sesuai dengan rekaman DFR saluran 2, yaitu sebesar 546 kVp setelah CB reaktor ditutup.

Langkah kelima adalah melakukan simulasi dan analisis profil tegangan setelah dilakukan perubahan skenario manuver saat pemberian tegangan pada saluran transmisi. Lalu, langkah keenam adalah melakukan simulasi dan analisis profil tegangan setelah dilakukan perubahan desain skema proteksi dengan mengubah desain perintah buka CB reaktor saat gangguan satu fase.

Langkah ketujuh adalah melakukan simulasi dan analisis profil tegangan setelah dilakukan penambahan *overvoltage relay* (OVR) pada saluran transmisi. Langkah kedelapan adalah melakukan simulasi pembebanan untuk dilakukan pengamatan profil tegangan pada kondisi beban minimal, beban maksimal, kenaikan beban bertahap, dan pelepasan beban dari maksimal ke minimal. Simulasi pembebanan dilakukan menggunakan *inter bus transformer* (IBT) yang terpasang pada GITET, dengan data sebagai berikut.

- Pada GITET W terdapat dua IBT dengan kapasitas 500 MVA tiap trafo.
- Pada GITET Y terdapat dua IBT berkapasitas 500 MVA tiap trafo.

- Pada GITET Z terdapat dua IBT dengan kapasitas 500 MVA tiap trafo.

Hasil dari langkah kelima sampai kedelapan akan dibahas dalam subbagian IV.A sampai subbagian IV.D.

#### IV. HASIL PENELITIAN

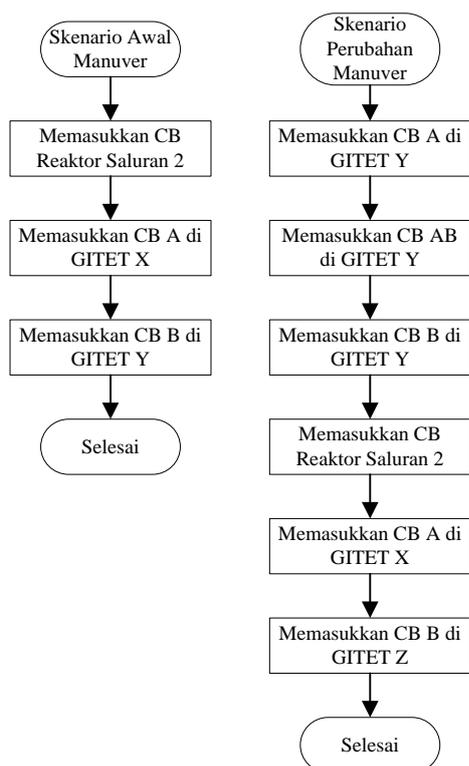
Pada bagian ini, ditunjukkan hasil simulasi dari langkah kelima sampai kedelapan dalam mengantisipasi dan mengatasi tegangan lebih pada saluran.

##### A. MELAKUKAN PERUBAHAN SKENARIO MANUVER SAAT PROSES PEMBERIAN TEGANGAN

Perubahan nilai impedans saluran dapat dilakukan dengan memperpanjang saluran transmisi, yaitu dengan rekonfigurasi urutan manuver pemberian tegangan, seperti dijelaskan pada Gambar 5.

Gambar 5(a) merupakan diagram satu garis urutan manuver sesuai *standard operating procedure* (SOP) awal pemberian tegangan, sedangkan Gambar 5(b) menunjukkan diagram satu garis perubahan manuver pemberian tegangan. Urutan manuver pemberian tegangan dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 6.

Dari Gambar 6, tampak bahwa skenario awal dilakukan dengan memosisikan CB A dan AB di GITET X dan GITET Y pada posisi terbuka. Selanjutnya, proses pertama dilakukan dengan menutup CB reaktor pada saluran, kemudian pada proses kedua dan ketiga CB A di GITET X dan CB B di GITET Y ditutup [30]. Pada saat CB reaktor ditutup, saluran mengalami tegangan lebih, padahal belum terinjeksi tegangan. Untuk mengantisipasi hal tersebut, dilakukan perubahan skenario manuver pada saat pemberian tegangan, dengan proses pertama yaitu memasukkan CB A, dilanjutkan dengan CB AB dan CB B di GITET Y. Setelah semua CB di GITET Y



Gambar 6. Diagram alir urutan manuver pemberian tegangan sesuai prosedur awal dan setelah perubahan.

dimasukkan, proses selanjutnya adalah memasukkan CB reaktor saluran kedua. Kemudian, secara berurutan CB A di GITET X dan CB B di GITET Z dimasukkan.

Proses perubahan manuver tersebut menjadikan kapasitans yang memengaruhi tegangan induksi menjadi sepanjang 253 km, yaitu saluran transmisi dari GITET X-Y-Z. Pada mulanya, kapasitans yang memengaruhi tegangan induksi adalah sepanjang 93 km, sesuai panjang saluran dari GITET X ke Y. Bertambahnya panjang saluran akan memengaruhi nilai *shunt compensation degree* ( $k$ ). Setelah dilakukan perhitungan berdasarkan (2), diperoleh hasil sebagai berikut.

$$k = \frac{1}{\omega^2 \cdot L \cdot (C_{pg} + 3 \cdot C_{pp})}$$

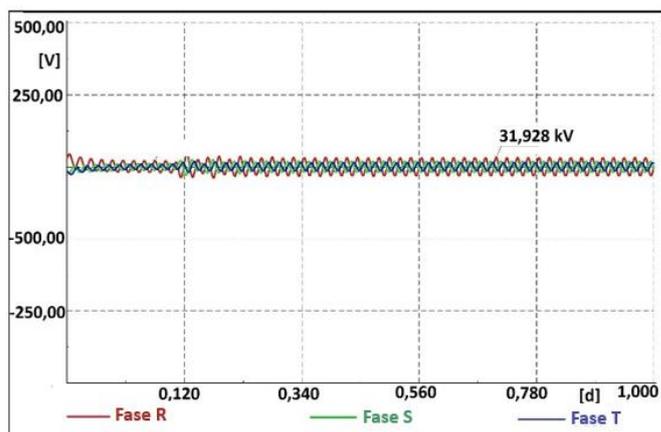
$$k = \frac{1}{(2.3,14.50)^2 \times \frac{7.93}{3} \times (1,66 + 3 \times 0,83) \times 10^{-11} \times 253000}$$

$$k = 0,3654 = 36,54\%$$

Nilai *shunt compensation degree* ( $k$ ) sebesar 36,54% tidak berpotensi menimbulkan tegangan lebih. Hal ini diketahui setelah dilakukan pembuktian dengan simulasi perubahan skenario manuver tersebut ke dalam perangkat lunak Digsilent Power Factory. Gambar 7 merupakan profil tegangan hasil simulasi perubahan manuver pemberian tegangan yang menunjukkan tidak terjadinya tegangan lebih pada saluran. Tegangan pada saluran terukur sebesar 31,928 kVp setelah dimasukkan CB reaktor pada waktu 0,1 s.

### B. PERUBAHAN DESAIN SKEMA PROTEKSI PADA SAAT GANGGUAN 1 FASE

Ketika saluran transmisi X ke Y sudah dapat beroperasi dan rangkaian ganda terinjeksi tegangan, dilakukan antisipasi terhadap gangguan satu fase dengan kondisi CB reaktor masih masuk. Pada desain awal, skema CB reaktor akan membuka apabila mendapatkan perintah membuka dari lima masukan gerbang OR. Kelima masukan tersebut adalah



Gambar 7. Hasil simulasi perubahan skenario manuver saat proses pemberian tegangan.

- relai *circulating current protection* (CCP),
- gangguan tiga fase pada saluran,
- relai *circuit breaker failure* (CBF) A,
- relai *circuit breaker failure* (CBF) B, dan
- relai *overvoltage* (*overvoltage relay*, OVR).

Dari desain awal tersebut, ketika terjadi gangguan satu fase, CB reaktor tidak diperintahkan oleh relai pengaman untuk membuka, sehingga tegangan pada fase yang tidak terganggu akan terpengaruh. Hal ini terjadi karena nilai kapasitans saluran pada fase yang terganggu dapat mengakibatkan resonansi apabila ujung saluran masih terhubung dengan reaktor *shunt* [31].

Untuk mengantisipasi kondisi tersebut, dilakukan perubahan desain pada skema pembukaan CB reaktor, yaitu dengan menambahkan gangguan satu fase pada saluran sebagai salah satu syarat pembukaan CB reaktor saat gangguan. Ketika terjadi gangguan satu fase, syarat membuka CB reaktor menjadi enam masukan yang masuk ke dalam satu gerbang OR, yaitu:

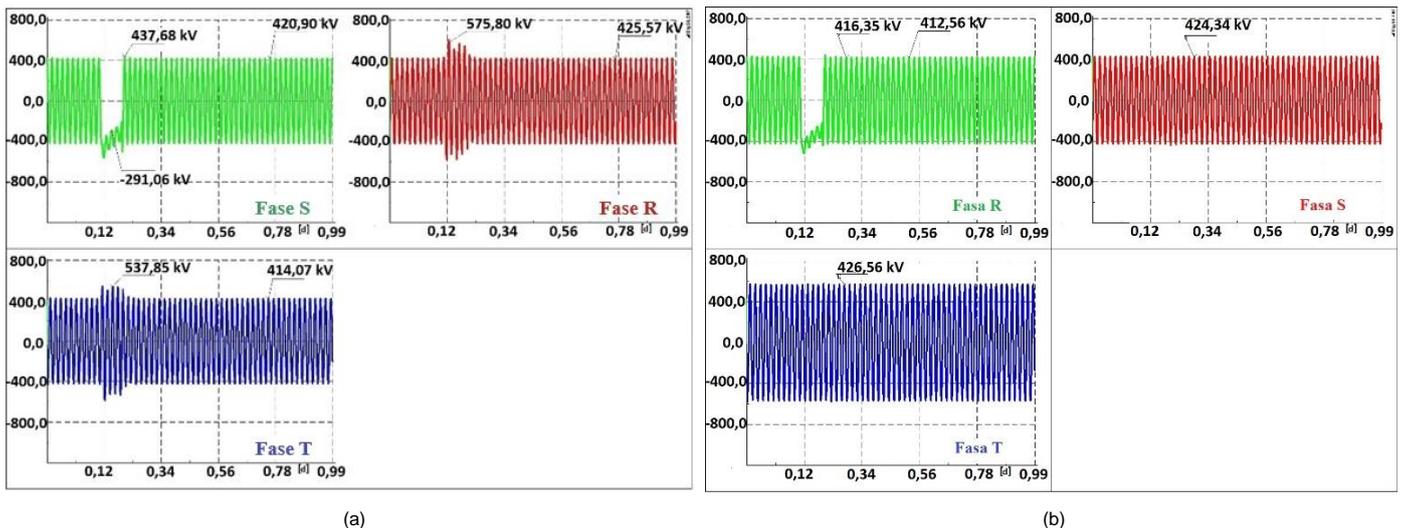
- relai CCP,
- gangguan satu fase pada saluran,
- gangguan tiga fase pada saluran,
- relai CBF A,
- relai CBF B, dan
- OVR.

CB reaktor akan membuka apabila menerima salah satu dari enam sinyal gangguan tersebut. Untuk mengetahui profil tegangan pada fase yang tidak terganggu ketika terjadi gangguan satu fase, dilakukan simulasi dengan memberikan gangguan pada fase R. Gambar 8(a) menunjukkan hasil simulasi pada saat gangguan satu fase di fase R. Fase S dan fase T yang tidak terganggu mengalami kenaikan tegangan menjadi 575,79 kVp dan 537,8 kVp.

Gambar 8(b) merupakan hasil simulasi setelah dilakukan perubahan desain proteksi. Gambar tersebut menunjukkan tidak adanya kenaikan tegangan pada fase yang tidak terganggu, yaitu fase S dan fase T, dengan nilai tegangan sebesar 424 kVp dan 426 kVp. Tegangan pada fase S dan fase T menjadi normal kembali setelah rangkaian paralel antara reaktor dan saluran penyebab resonansi tegangan lebih diputus, dengan membuka CB reaktor.

### C. PENAMBAHAN OVR PADA JARINGAN

Untuk mengantisipasi terjadinya tegangan lebih setelah saluran dapat beroperasi dan rangkaian ganda terinjeksi tegangan, perlu dilakukan pemasangan OVR dengan dua



Gambar 8. Profil tegangan ketika gangguan satu fase, (a) dengan CB reaktor tetap masuk, (b) dengan CB reaktor sudah dibuka.

skema. Pertama, OVR dasar digunakan sebagai proteksi jika terjadi tegangan lebih pada saluran dengan tiga perintah sinyal keluaran, yaitu:

- membuka CB reaktor,
- membuka CB saluran, dan
- mengirimkan sinyal *direct transfer trip* (DTT) ke GITET lawan.

Skema yang kedua adalah OVR resonansi. Skema ini dibuat untuk mengantisipasi tegangan lebih saat terjadi gangguan satu atau tiga fase, tetapi CB reaktor gagal membuka karena permasalahan internal, seperti kerusakan mekanis atau permasalahan pada rangkaian. Skema logika OVR yang kedua memiliki dua tahap waktu tunda dengan target yang berbeda dalam memerintahkan membuka CB, yaitu sebagai berikut.

- Waktu tunda tahap satu memiliki durasi waktu 2 s dengan sinyal keluaran memerintahkan membuka CB reaktor kembali.
- Waktu tunda tahap dua memiliki durasi waktu tambahan 3 s. Tahap dua ini berjalan apabila CB reaktor belum membuka pada saat diperintah buka tahap satu. Sinyal keluaran akan memerintahkan membuka CB saluran dan CB reaktor saluran sebelahnya, sehingga dapat menghilangkan tegangan lebih akibat pengaruh induksi saluran lain (sebelah).

Gambar 9(a) menunjukkan hasil pengamatan profil tegangan pada saat terjadi gangguan di saluran, tetapi CB reaktor tetap tertutup. Tegangan naik hingga 498,8 kVp, padahal kondisi CB saluran sudah dalam posisi terbuka. Hasil simulasi dari penerapan OVR resonansi tersebut terlihat pada Gambar 9(b), yang menunjukkan bahwa tegangan turun mencapai 84,87 kVp setelah CB saluran sebelah dibuka. Penurunan tegangan terjadi karena pengaruh induksi ke rangkaian paralel reaktor yang gagal membuka dengan saluran yang terganggu telah dihilangkan ketika pembukaan CB saluran sebelah.

#### D. SIMULASI PEMBEBANAN PADA SALURAN

Setelah saluran transmisi X ke Y dapat beroperasi dan rangkaian ganda terinjeksi tegangan, dilakukan simulasi pembebanan pada saluran tersebut dengan beberapa simulasi dibawah ini.

- Beban maksimal 100%, yaitu setara dengan 3.000 MVA. Hal ini dilakukan dengan memasukkan semua IBT pada saluran W sampai Z.

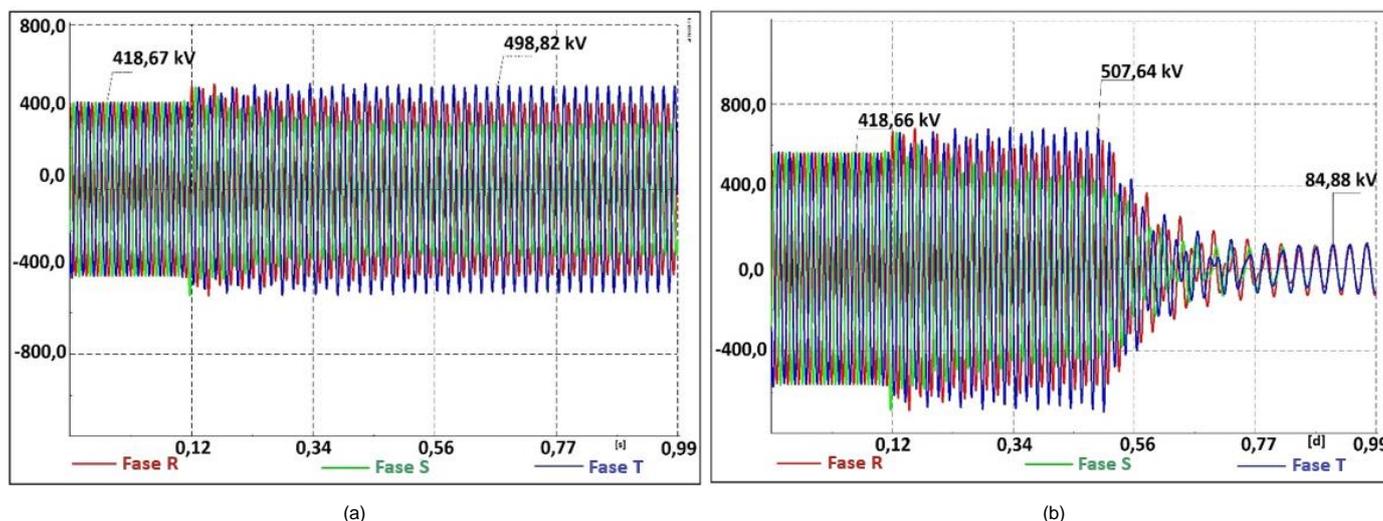
- Beban minimal 0%, dengan tidak memasukkan IBT pada saluran W sampai Z.
- Menaikkan beban secara bertahap dengan rentang 14% sampai 17%, setara dengan 410 MVA sampai 520 MVA.
- Pelepasan beban dari beban maksimal 100% ke beban minimal 0%, sehingga pada kondisi ini IBT terlepas dari sistem.

Dari keempat simulasi tersebut, selanjutnya dilakukan pengamatan tegangan pada saluran 1 dan saluran 2, yaitu pada saat proses *switching* dan pada waktu tunak (*steady state*). Pengamatan pada saat proses *switching* dilakukan untuk melihat tegangan transien yang timbul pada proses *switching*.

Proses memasukkan dan melepas beban seringkali mengakibatkan tegangan lebih sesaat. Oleh karena itu, dilakukan pengamatan tegangan tunak untuk mengamati dan memastikan bahwa tidak ada tegangan lebih dalam waktu yang lama pada saluran setelah proses pembebanan dilakukan. Hasil simulasi pembebanan saluran diperlihatkan dalam Tabel I dan Tabel II.

Tabel I dan Tabel II menunjukkan bahwa tegangan *switching* pada saat proses pembebanan saluran tertinggi adalah 1,1 p.u. atau setara dengan 550 kV. Tegangan sebesar 1,1 p.u. ini masih aman dan tidak merusak peralatan seperti CB, *current transformer* (CT), DS, dan *lightning arrester* (LA) yang terpasang karena peralatan tersebut memiliki kemampuan menahan tegangan *switching* hingga 1.175 kV, sesuai data teknis peralatan terpasang.

Pada kondisi beban maksimal 100%, terjadi penurunan tegangan hingga 0,982 p.u. atau setara dengan 491 kV. Penurunan tegangan ini masih dalam batas aman sesuai aturan jaringan sistem tenaga listrik/*grid code* tahun 2020, yaitu batas kenaikan tegangan adalah +5% atau 525 kV dan penurunan tegangan adalah -5% atau 475 kV. Tegangan tunak tertinggi adalah 1,06 p.u. atau setara dengan 530 kV, yang terjadi pada kondisi beban 0% sampai 33% atau 0 MVA sampai 990 MVA. Tegangan ini melebihi batas 5% kenaikan tegangan. Tegangan tunak terendah sebesar 0,982 p.u. atau setara 491 kV, yang terjadi ketika beban maksimal 100% atau 3.000 MVA. Kondisi tegangan tunak terendah ini masih dalam batas standar *grid code*, yaitu -5% [32]. Tabel III menunjukkan tegangan *switching* pada saat pelepasan beban dari 100% atau 3.000 MVA sampai 0%, dengan kondisi tidak ada IBT yang terhubung pada saluran W sampai Z.



Gambar 9. Profil tegangan, (a) saat kondisi terjadi gangguan saluran dan CB reaktor tetap masuk, (b) setelah penerapan OVR resonansi dengan membuka CB sebelah.

TABEL I  
PROFIL TEGANGAN SWITCHING KETIKA PEMBEBANAN

Saluran	Tegangan Switching Saat Pembebanan (p.u.)						
	100%	83%	66%	50%	33%	16%	0%
Saluran 1	0,982	1,057	1,106	1,116	1,143	1,075	1,074
Saluran 2	0,987	1,061	1,111	1,112	1,131	1,075	1,074

TABEL II  
PROFIL TEGANGAN TUNAK KETIKA PEMBEBANAN

Saluran	Tegangan Tunak Saat Pembebanan (p.u.)						
	100%	83%	66%	50%	33%	16%	0%
Saluran 1	0,982	1,012	1,032	1,048	1,060	1,060	1,061
Saluran 2	0,982	1,019	1,040	1,052	1,060	1,060	1,060

TABEL III  
PROFIL TEGANGAN KETIKA PELEPASAN BEBAN

Saluran	Tegangan Switching Saat Pelepasan Beban (p.u.)
Saluran 1	1,437
Saluran 2	1,417

Tegangan *switching* pada saluran 1 sebesar 1,437 p.u. atau setara dengan 718,5 kV, sedangkan tegangan *switching* pada saluran 2 sebesar 1,417 p.u. atau setara dengan 708,5 kV. Tegangan *switching* yang terukur pada saat pelepasan beban masih dalam batas aman peralatan karena peralatan terpasang memiliki kemampuan menahan tegangan *switching* hingga 1.175 kV.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi terhadap upaya-upaya yang dilakukan untuk mengurangi tegangan lebih pada saluran X-Y, dapat disimpulkan bahwa penyebab munculnya resonansi tegangan lebih di saluran yang belum terinjeksi tegangan pada saluran rangkaian ganda ketika saluran 2 telah bertegangan adalah nilai *shunt compensation degree* ( $k$ ) mencapai 99,42%, yang didapatkan dari nilai kapasitas reaktor terpasang 100 MVAR dan panjang saluran 93 km. Langkah untuk menurunkan tegangan lebih tersebut adalah dengan mengubah skenario pada saat proses pemberian tegangan, yaitu dengan memasukkan terlebih dahulu CB A, AB, dan B pada GITET Y untuk memperpanjang saluran menjadi 253 km, sehingga nilai *shunt compensation degree* ( $k$ ) menjadi 36,54% dan nilai

tegangan yang terukur menjadi 31,9 kVp setelah proses penutupan CB reaktor. Pada saat rangkaian ganda telah beroperasi, perlu ditambahkan skema SPAR sebagai syarat pada pembukaan CB reaktor untuk mengantisipasi kenaikan tegangan pada fase yang tidak terganggu. Setelah dilakukan simulasi, terbukti bahwa proses ini dapat menurunkan kenaikan tegangan pada fase yang tidak terganggu. Penambahan OVR dilakukan sebagai antisipasi jika terjadi tegangan lebih pada saluran, tetapi CB reaktor tidak dapat terbuka karena gangguan internal. Proses ini dilakukan dengan skema memerintah buka CB saluran sebelah, yang berhasil disimulasikan dan dapat menurunkan tegangan hingga 84,87 kVp.

Simulasi pembebanan pada saluran menunjukkan bahwa tegangan tunak masih berada di atas batas aman +5% pada saat beban di bawah 990 MVA, sedangkan ketika beban dinaikkan hingga maksimal 3.000 MVA, penurunan tegangan masih sesuai standar, yaitu tidak sampai -5%. Tegangan *switching* pada saat proses menaikkan beban secara bertahap dan pada saat pelepasan beban masih dalam batas aman kapasitas kemampuan peralatan dalam menahan tegangan *switching*.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis makalah dengan judul “Skema Proteksi Resonansi Tegangan Lebih Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV” menyatakan bahwa makalah ini bebas dari konflik kepentingan.

## KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Imam Ghozali, Mochammad Facta, dan Abdul Syakur; perangkat lunak, Imam Ghozali; validasi, Mochammad Facta dan Abdul Syakur; analisis formal, Imam Ghozali, Mochammad Facta, dan Abdul Syakur; sumber, Imam Ghozali; penulisan-persiapan draf asli, Imam Ghozali; penulisan-review dan penyuntingan, Imam Ghozali, Mochammad Facta, dan Abdul Syakur.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Hibah Penelitian Strategis Tahun 2023 Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro.

## REFERENSI

- [1] A.P. Singh, S. Ghosh, A.S. Rones V., dan S. Sahay, “Analysis and Mitigation of Secondary Arcing & Resonance Overvoltage Problem in Shunt Compensated Lines -Case Study,” 2022 *IEEE IAS Glob. Conf. Emerg. Technol. (GlobConET)*, 2022, hal. 140–145, doi: 10.1109/GlobConET53749.2022.9872373.

- [2] R.M.A. Velásquez dan J.V.M. Lara, "The Problem of the Actual Insulation Coordination for 500 kV with Overvoltage in Substations and the Needed for More Surge Arresters in High Voltage Grid," *Ain Shams Eng. J.*, Vol. 4, No. 9, hal. 1–15, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102130.
- [3] Y.L. Xin dkk., "Configuration of Suppression Schemes Against High-Frequency Transient Reignition Overvoltages Caused by Shunt Reactor Switching-Off in Offshore Wind Farms," *Int. J. Elect. Power, Energy Syst.*, Vol. 141, hal. 1–10, Okt. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108170.
- [4] H. Ren, "Analysis on Switching Overvoltage of 500 kV GIS Disconnecter," *Energy Reports*, Vol. 8, hal. 169–176, Agu. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.02.143.
- [5] S. Grebovic, N. Oprasic, dan A. Balota, "Influence of Shunt Reactor Switching on Overvoltages in 400 kV Substation," *2020 9th Mediterr. Conf. Embed. Comput. (MECO)*, 2020, hal. 1–4, doi: 10.1109/MECO49872.2020.9134116.
- [6] N. Pfeifer, M. Kizilcay, dan P. Malicki, "Analytical and Numerical Study of an Iron-Core Shunt-Compensation Reactor on a Mixed Transmission Line," *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 220, hal. 1–8, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109315.
- [7] A. Župan, B. Filipović-Grčić, dan D. Filipović-Grčić, "Transients Caused by Switching of 420kV Three-Phase Variable Shunt Reactor," *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 138, hal. 50–57, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2015.12.010.
- [8] J. Hu, P. Yuan, X. Li, dan Y. Liu, "Analysis on the Necessity of High-Voltage Shunt Reactors in Power Grid," *2020 10th Int. Conf. Power, Energy Syst. (ICPES)*, 2020, hal. 83–87, doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349640.
- [9] V. Yari, S.H. Khalaj, dan F. Ghelichi, "A Study on Reclosing of Asaluyeh-Isfahan 765 kV Transmission Line Considering the Effect of Neutral Reactor in Reducing Resonant Voltages," *2012 Asia-Pac. Power, Energy Eng. Conf.*, 2012, hal. 1–5, doi: 10.1109/APPEEC.2012.6307333.
- [10] Y. Wang dan X. Wang, "Influence of Combined Protective Circuit Parameters on Protective Effect of Breaking Overvoltage for Shunt Reactor," *2018 12th IEEE Int. Conf. Prop., Appl. Dielect. Mater. (ICPADM)*, 2018, hal. 852–855, doi: 10.1109/ICPADM.2018.8401162.
- [11] M.H. Samimi dkk., "Reactor Failure Due to Resonance in Zahedan-Irانشahr Parallel EHV Lines, Analysis and Practical Solutions," *Acta Polytech. Hung.*, Vol. 11, No. 1, hal. 63–78, Jul. 2014, doi: 10.12700/APH.11.01.2014.01.5.
- [12] M. Pickett, H. Manning, dan H.V. Geem, "Near Resonant Coupling on EHV Circuits: I - Field Investigations," *IEEE Trans. Power Appar., Syst.*, Vol. PAS-87, No. 2, hal. 322–325, Feb. 1968, doi: 10.1109/TPAS.1968.292025.
- [13] M. Hesse dan D. Wilson, "Near Resonant Coupling on EHV Circuits: II - Methods of Analysis," *IEEE Trans. Power Appar., Syst.*, Vol. PAS-87, No. 2, hal. 326–334, Feb. 1968, doi: 10.1109/TPAS.1968.292026.
- [14] K. Priest, A. Ramirez, H. Nowak, dan J. LaForest, "Resonant Voltages Reactor Compensated Extra-High-Voltage Lines," *IEEE Trans. Power Appar., Syst.*, Vol. PAS-91, No. 6, hal. 2528–2536, Nov. 1972, doi: 10.1109/TPAS.1972.293432.
- [15] X. Liu, P. Zhang, X. Deng, dan D. Sun, "Hierarchical Overvoltage Predictive Control Scheme for a DFIG-Based Wind Farm," *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 217, hal. 1–19, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109172.
- [16] Y. Li, Y. Zeng, W. Zhang, dan C. Qin, "Coordinated Optimization Method for Suppressing Transient Overvoltage Caused by HVDC Commutation Failure Considering Large Wind Power Integration," *Energy Rep.*, Vol. 9, hal. 1171–1182, Des. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2022.12.037.
- [17] J. Santiago dan M.C. Tavares, "Relevant Factors for Temporary Overvoltages Due to Fault-Resonance Conditions on Half-Wavelength Transmission Lines," *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 175, hal. 1–12, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105886.
- [18] E. Nashawati, N. Fischer, B. Le, dan D.I. Taylor, "Impacts of Shunt Reactors on Transmission Line Protection," dipresentasikan dalam 38th Annu. West. Prot. Relay Conf., Spokane, WA, AS, 18–20 Okt. 2011.
- [19] F. Iliceto, E. Cinieri, dan A. Vita, "Overvoltages Due to Open-Phase Occurrence in Reactor Compensated EHV Lines," *IEEE Trans. Power Appar., Syst.*, Vol. PAS-103, No. 3, hal. 474–482, Mar. 1984, doi: 10.1109/TPAS.1984.318725.
- [20] X. Lei dkk., "Research on Resonance Overvoltage of EHV Transmission Lines Caused by Lightning Strike," *IEEE Access*, Vol. 9, hal. 123777–123785, Sep. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3109597.
- [21] X. Xiao dan W. Lu, "Simulation Analysis on Lightning Overvoltage of 500kV Substation," *16th IET Int. Conf. AC, DC Power Trans. (ACDC 2020)*, 2020, hal. 1668–1672, doi: 10.1049/icp.2020.0189.
- [22] C. Jaipradidham, "Probability Parameter Estimation of Outage Rate Effects for Lightning Overvoltage Analysis on 500 kV EHV Double Circuit Transmission Lines Using Neural Networks," *2005 Int. Power Eng. Conf.*, Vol. 2, 2005, hal. 803–808, doi: 10.1109/IPEC.2005.207018.
- [24] T. Lin dkk., "Analysis of Effect of System Configuration and Parameters on Energization Overvoltage in 330kV Hybrid OHL-Cable System," *2020 IEEE Int. Conf. on High Volt. Eng., Appl. (ICHVE)*, 2020, hal. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279731.
- [25] X. Gu dkk., "The Simulation of the Controllable Reactor and It's Application in Ultra High Voltage Transmission Lines," *2011 Int. Conf. Adv. Power Syst. Automat., Prot.*, 2011, hal. 1833–1837, doi: 10.1109/APAP.2011.6180664.
- [26] V. Kuchanskyy, "Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymmetric Modes," *2019 IEEE 6th Int. Conf. Energy Smart Syst. (ESS)*, 2019, hal. 122–125, doi: 10.1109/ESS.2019.8764196.
- [27] M.V. Escudero dan M. Redfern, "Effects of Transmission Line Construction on Resonance in Shunt Compensated EHV lines," dipresentasikan dalam Int. Conf. Power Syst. Transients (IPST'05), Montreal, Kanada, 19–23 Jun. 2005, Paper IPST05 – 109.
- [28] W. Reid, R. Gustin, dan P. Zylstra, "Guidelines for Determining Parallel Resonance on EHV Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Appar., Syst.*, Vol. PAS-102, No. 9, hal. 3196–3204, Sep. 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.318129.
- [29] J.R. Marti, "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations," *IEEE Trans. Power Appar., Syst.*, Vol. PAS-101, No. 1, hal. 147–157, Jan. 1982, doi: 10.1109/TPAS.1982.317332.
- [29] M.H. Samimi, I. Ahmadi-Joneidi, A. Majzoobi, dan S. Golshannavaz, "Appropriate Selection of Shunt Compensation Reactor in Parallel Transmission Lines: A Case Study," *Int. J. Elect. Power, Energy Syst.*, Vol. 96, hal. 163–173, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.09.041.
- [30] *SOP Energize GITET 500 kV Indramayu*, Vol. 072/PR/P2B-OPS-DLP, PT PLN UIP2B Jawa, Depok, Indonesia, 2021.
- [31] *Control and Schematic GITET PLTU Indramayu 500 kV*, ABB Sakti Industri, Jakarta, Indonesia, 2021.
- [32] "Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code)," Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, No. 20, 2020.