

ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN PADA BUS 6,3 KV SUBSTATION 2A DAN SUBSTATION 2B DENGAN MENGGUNAKAN ETAP 12.6

Suharko¹, H. M. Taqiyyuddin², Sugiono²

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang, Jl. MT. Haryono 193 Malang
massuharkotbn@gmail.com

ABSTRAKSI

Pabrik Semen Indonesia Plant Tuban 1 adalah salah satu dari 4 pabrik yang ada di PT. Semen Indonesia yang dalam proses operasinya banyak menggunakan Transformator dan motor yang dilengkapi dengan VSD (Variabel Speed Drive) dan converter yang fungsinya untuk mengatur kecepatan yang membutuhkan tenaga listrik. Maka dari itu dibutuhkan sebuah sistem tenaga listrik yang handal supaya pabrik bisa beroperasi dengan efisien. Jika kita lihat dari komponen biaya produksi, listrik menduduki peringkat dua dari keseluruhan total biaya produksi. Hal tersebut menunjukkan betapa pentingnya listrik bagi operasional pabrik. Kondisi aktual yang terjadi di lapangan saat ini adalah tegangan di sisi tegangan menengah substation 2B lebih rendah dibandingkan substation 2A. Ketidakseimbangan ini menyebabkan operator main substation kesulitan untuk menentukan tegangan yang harus diberikan untuk line 1. Pengaturan nilai tegangan sumber untuk line 1 dilakukan dengan merubah tap changer trafo 1 main substation. Naik turunnya tegangan sumber akan menyebabkan naik turunnya tegangan di dua substation. Ketika tegangan di substation 2A berada pada nilai nominal, tegangan di substation 2B pasti berada di bawah nominal. Hal tersebut tidak baik untuk operasi peralatan yang terhubung ke substation 2B karena menyebabkan peralatan menarik arus yang lebih besar. Di sisi lain, ketika tegangan di substation 2B berada pada nilai nominal, maka tegangan di substation 2A akan lebih tinggi dari nilai nominal. Hal ini juga berbahaya karena bisa merusak isolasi dan menyebabkan trip overvoltage.

Solusi dari permasalahan tersebut adalah dengan memindahkan tap changer diantara dua trafo di substation 2A dan di substation 2B. Dimana kondisi saat ini yang paling mudah yaitu dengan memindahkan tap changer pada trafo di substation 2B, maka dari itu penulis mengangkat tema studi analisa ketidakseimbangan tegangan di bus substation 2A dan bus substation 2B. Diharapkan hasil dari penelitian dapat berguna dan bisa diimplementasikan untuk menyelesaikan permasalahan sehingga tercipta sistem kelistrikan yang handal.

Kesimpulan dari permasalahan tersebut dengan mengubah tap changer substation 2B diposisi 4 akan membuat sama tegangan pada bus substation 2A dan bus substation 2B sehingga bila dinaikkan dan diturunkan tegangan untuk proses operasional pabrik pada trafo line 1 Main substation 1 tidak akan berdampak terjadinya overvoltage maupun undervoltage pada tegangan menengah pada bus substation 2A dan bus substation 2B.

Kata Kunci : *trip overvoltage, er (electrical room), Substation 2A, Substation 2B, Main substation, Rawmill, Kiln., tap changer.*

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, FT UIM

² Dosen Jurusan Teknik Elektro, FT UIM

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Persaingan industri semen di Indonesia saat ini sangat ketat. Munculnya brand baru membuat pilihan konsumen menjadi lebih variati. Semen Indonesia sebagai pemain lawas di industri ini sekarang memiliki tantangan lebih karena banyaknya pesaing. Supaya tetap kompetitif dengan para kompetitor Semen Indonesia dituntut untuk bisa mengoperasikan pabrik seefisien mungkin. Salah satu upaya untuk membuat operasi lebih efisien adalah dengan penerapan *cost management* untuk mengendalikan biaya produksi dan distribusi yang meningkat akibat dicabutnya subsidi listrik dan BBM oleh pemerintah. Semen

Indonesia juga menggalakkan program konservasi dan penghematan energi, karena komponen tersebut menyumbang biaya terbesar dalam produksi semen. Setiap produksi 1 ton clinker memerlukan biaya energi listrik 116,961 rupiah. Dengan target peningkatan kapasitas produksi di tahun 2015, maka pengeluaran untuk kedua energi ini juga akan naik. Pada bulan Januari 2015, produksi clinker mencapai 978,295 ton dari target RKAP sebesar 974,400 ton. Dengan kata lain, pengeluaran bahan bakar pada bulan Januari di Pabrik tuban mencapai 140 miliar rupiah. Jika pengeluaran untuk biaya produksi per bulan variansinya tidak signifikan, maka dalam satu tahun total konsumsi bahan bakar dan listrik akan

menghabiskan biaya sebesar 1.6 triliun. Biaya ini akan semakin tinggi akibat dicabutnya subsidi energi listrik. Kapasitas terpasang satu plant pabrik tuban saat ini memerlukan daya listrik sebesar 40 MVA setiap tahunnya untuk produksi 2.5 sampai 3 juta ton semen. Dalam rangka mengatasi kenaikan kebutuhan energi listrik, Semen Indonesia melakukan berbagai modifikasi di sistem tenaga listrik, misalnya pembangunan *Waste Heat Recovery Generator* (WHRG) di Pabrik Tuban yang *groundbreaking*-nya dilaksanakan pada tahun 2015. Selain itu terdapat penambahan OK Mill di area Finish Mill Tuban 1-2 yang memerlukan upgrade sistem distribusi tenaga listrik. Modifikasi ini harus disertai dengan evaluasi sistem distribusi seperti *load flow*, *power factor*, hubung singkat, dan stabilitas. Sistem kelistrikan memegang peranan yang penting dalam keberjalanan operasional pabrik. Hampir semua peralatan yang ada di pabrik digerakkan oleh motor-motor yang membutuhkan tenaga listrik. Maka dari itu dibutuhkan sebuah sistem tenaga listrik yang handal supaya pabrik bisa beroperasi dengan efisien. Jika kita lihat dari komponen biaya produksi, listrik menduduki peringkat dua dari keseluruhan total biaya produksi. Hal tersebut menunjukkan betapa pentingnya listrik bagi operasional pabrik. Saat ini terdapat isu yang hangat diperbincangkan berkaitan dengan kehandalan sistem kelistrikan. Isu hangat tersebut adalah perbedaan tegangan di sisi tegangan menengah antara substation 2A dan substation 2B. Dua substation tersebut disuplai dari sumber yang sama yaitu line 1 mainsubstation 1. Perbedaan tersebut menimbulkan masalah karena mengganggu operasi sistem. Saat ini tegangan di substation 2A lebih tinggi dibandingkan tegangan di substation 2B. Di dalam operasi tenaga listrik tegangan memegang peranan yang penting. Apalagi mayoritas dari peralatan listrik yang ada di pabrik berupa motor. Motor adalah beban dengan karakteristik daya konstan. Apabila motor dioperasikan pada tegangan yang lebih rendah dari tegangan nominal, maka motor menarik arus yang lebih besar dibandingkan arus nominalnya. Kondisi ini bisa membuat motor lebih panas dan lama kelamaan merusak belitannya. Hal tersebut dapat membuat usia pakai motor berkurang. Motor juga tidak diperbolehkan bekerja pada tegangan yang lebih tinggi dari tegangan nominalnya. Hal tersebut dapat menurunkan kemampuan isolasinya. Kondisi aktual yang terjadi di lapangan saat ini adalah tegangan di sisi tegangan menengah substation 2B lebih rendah dibandingkan substation 2A. Padahal dua bus tersebut disuplai dari sumber yang sama. Ketidakseimbangan ini menyebabkan operator mainsubstation kesulitan untuk menentukan tegangan yang harus diberikan untuk line 1. Pengaturan nilai tegangan sumber untuk line 1 dilakukan dengan merubah *tap changer* trafo 1 mainsubstation. Naik turunnya tegangan sumber

akan menyebabkan naik turunnya tegangan di dua substation.

- Gambar 1. 1 Ilustrasi ketidakseimbangan tegangan antara Subs 2A dan Subs 2B. Ketika tegangan di substation 2A berada pada nilai nominal, tegangan di substation 2B pasti berada di bawah nominal. Hal tersebut tidak baik untuk operasi peralatan yang terhubung ke substation 2B karena menyebabkan peralatan menarik arus yang lebih besar. Di sisi lain, ketika tegangan di substation 2B berada pada nilai nominal, maka tegangan di substation 2A akan lebih tinggi dari nilai nominal. Hal ini juga berbahaya karena bisa merusak isolasi dan menyebabkan *trip overvoltage*. Dari sejarah operasi sistem, *trip overvoltage* pernah terjadi di substation 2A. Pada tahun 2014 substation 2A dua kali mengalami *trip overvoltage* ketika operasi rawmill 1, fan 4 dan fan 5 dihentikan. Dampak dari *trip overvoltage* tersebut adalah hilangnya suplai daya ke seluruh beban yang terhubung ke substation 2A, mulai dari Kiln 1, er 5, er 16 dan Kiln 2. Hal tersebut tentu saja merugikan perusahaan karena produksi terak 1 dan terak 2 terhenti. Kejadian *trip overvoltage* seperti contoh di atas sebenarnya tidak perlu terjadi apabila isu ketidakseimbangan tegangan diperhatikan dan segera dilakukan perbaikan. Maka dari itu penulis mengangkat tema studi analisa ketidakseimbangan tegangan di bus substation 2A dan substation 2B. Diharapkan hasil dari penelitian dapat berguna dan bisa diimplementasikan untuk menyelesaikan permasalahan sehingga tercipta sistem kelistrikan yang handal.

4. Apa solusi yang dapat diajukan untuk memperbaiki ketidakseimbangan tegangan di substation 2A dan substatin 2B?

1.3. Tujuan Penelitian

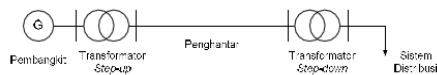
Tujuan dari penulisan makalah ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui performa tegangan pada kondisi aktual bus-bus yang terhubung dengan substation 2A dan substation 2B.
2. Mengetahui posisi *tap changer* trafo substation 2A dan substation 2B.
3. Mengetahui performa kapasitor yang berada di sistem yang terhubung dengan substation 2A dan substation 2B.
4. Mencari solusi dari ketidakseimbangan tegangan di substation 2A dan substation 2B.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Studi Aliran Daya

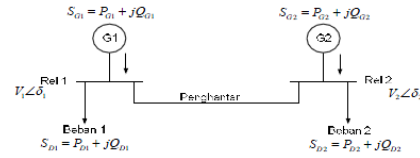
Komponen dasar yang membentuk suatu sistem tenaga listrik adalah generator, transformator, saluran transmisi dan beban. Untuk keperluan analisis sistem tenaga, diperlukan suatu diagram yang dapat mewakili setiap komponen sistem tenaga listrik tersebut. Diagram yang sering digunakan adalah diagram satu garis dan diagram impedansi atau diagram reaktansi. Gambar 2.1 merupakan diagram satu garis sistem tenaga listrik yang sederhana.



Gambar 2. 1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

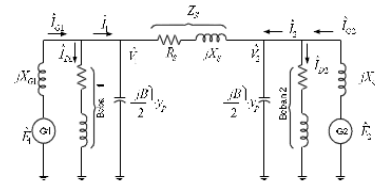
Studi aliran daya di dalam sistem tenaga merupakan studi yang penting. Studi aliran daya mengungkapkan kinerja dan aliran daya (nyata dan reaktif) untuk keadaan tertentu tatkala sistem bekerja saat tunak (*steady state*). Studi aliran daya juga memberikan informasi mengenai beban saluran transmisi di sistem, tegangan di setiap lokasi untuk evaluasi regulasi kinerja sistem tenaga dan bertujuan untuk menentukan besarnya daya nyata (*real power*), daya reaktif (*reactive power*) di berbagai titik pada sistem daya yang dalam keadaan berlangsung atau diharapkan untuk operasi normal. Studi aliran daya merupakan studi yang penting dalam perencanaan dan desain perluasan sistem tenaga listrik dan menentukan operasi terbaik pada jaringan yang sudah ada. Studi aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan serta pengembangan sistem di masa-masa yang akan datang. Karena seiring dengan bertambahnya kapasitas dan desain pabrik, maka akan selalu terjadi perubahan beban dan perubahan jaringan. Persamaan aliran daya secara sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.2 dibawah, untuk

sistem yang memiliki 2 rel. Pada setiap rel memiliki sebuah generator dan beban, walaupun pada kenyatannya tidak semua rel memiliki generator. Penghantar menghubungkan antara rel 1 dengan rel 2. Pada setiap rel memiliki 6 besaran elektris yang terdiri dari : P_D , P_G , Q_D , Q_G , V , dan δ .



Gambar 2. 2 Diagram Satu Garis sistem 2 rel

Pada Gambar 2.2 dapat dihasilkan persamaan aliran daya dengan menggunakan diagram impedansi. Pada Gambar 2.3 merupakan diagram impedansi dimana generator sinkron direpresentasikan sebagai sumber yang memiliki reaktansi dan transmisi model π (phi). Beban diasumsikan memiliki impedansi konstan dan daya konstan pada diagram impedansi.



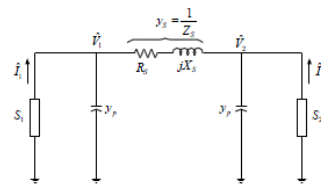
Gambar 2. 3 Diagram impedansi sistem 2 rel

Besar daya pada rel 1 dan rel 2 adalah

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (2.1)$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (2.2)$$

Pada Gambar 2.4 merupakan penyederhanaan dari Gambar 2.3 menjadi daya rel (rel daya) untuk masing-masing rel.



Gambar 2. 4 rel daya dengan transmisi model π untuk sistem 2 rel

Besarnya arus yang diinjeksikan pada rel 1 dan rel 2 adalah :

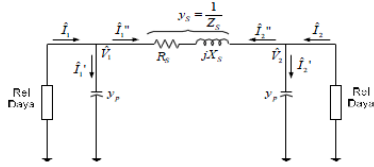
$$\hat{I}_1 = \hat{I}_{G1} - \hat{I}_{D1} \quad (2.3)$$

$$\hat{I}_2 = \hat{I}_{G2} - \hat{I}_{D2} \quad (2.4)$$

Semua besaran adalah diasumsikan dalam sistem per-unit, sehingga :

$$S_1 = \hat{V}_1 \hat{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \Rightarrow (P_1 - jQ_1) = \hat{V}_1^* \hat{I}_1 \quad (2.5)$$

$$S_2 = \hat{V}_2 \hat{I}_2^* = P_2 + jQ_2 \Rightarrow (P_2 - jQ_2) = \hat{V}_2^* \hat{I}_2 \quad (2.6)$$



Gambar 2. 5 Aliran arus pada rangkaian ekivalen Aliran arus dapat dilihat pada Gambar 2.5, dimana arus pada rel 1 adalah :

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_1' + \hat{I}_1''$$

$$\hat{I}_1 = \hat{V}_1 y_p + (\hat{V}_1 - \hat{V}_2) y_s$$

$$\hat{I}_1 = (y_p + y_s) \hat{V}_1 + (-y_s) \hat{V}_2 \quad (2.7)$$

$$\hat{I}_1 = Y_{11} \hat{V}_1 + Y_{12} \hat{V}_2 \quad (2.8)$$

Dimana :

Y11 adalah jumlah admitansi terhubung pada rel 1 = $y_p + y_s$ (2.9)

Y12 adalah admitansi negatif antara rel 1 dengan rel 2 = $-y_s$ (2.10)

Untuk aliran arus pada rel 2 adalah :

$$\hat{I}_2 = \hat{I}_2' + \hat{I}_2''$$

$$\hat{I}_2 = \hat{V}_2 y_p + (\hat{V}_2 - \hat{V}_1) y_s$$

$$\hat{I}_2 = (-y_s) \hat{V}_1 + (y_p + y_s) \hat{V}_2 \quad (2.11)$$

$$\hat{I}_2 = Y_{21} \hat{V}_1 + Y_{22} \hat{V}_2 \quad (2.12)$$

Dimana :

Y22 adalah jumlah admitansi terhubung pada rel 2 = $y_p + y_s$ (2.13)

Y21 adalah admitansi negatif antara rel 2 dengan rel 1 = $-y_s = Y_{12}$ (2.14)

Dari Persamaan (2.8) dan (2.12) dapat dihasilkan Persamaan dalam bentuk

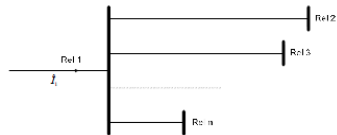
matrik, yaitu :

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

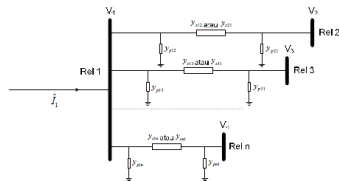
Notasi matrik dari Persamaan (2.15) adalah :

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.16)$$

Persamaan (2.5) hingga (2.16) yang diberikan untuk sistem 2 rel dapat dijadikan sebagai dasar untuk penyelesaian Persamaan aliran daya sistem n-rel. Gambar 2.6 menunjukkan sistem dengan jumlah n-rel dimana rel 1 terhubung dengan rel lainnya. Gambar 2.7 menunjukkan model transmisi untuk sistem n-rel.



Gambar 2. 6 Sistem n-rel



Gambar 2. 7 model transmisi π untuk sistem n-rel Persamaan yang dihasilkan dari Gambar 2.7 adalah :

$$\hat{I}_1 = \hat{V}_1 y_{p12} + \hat{V}_1 y_{p13} + \dots + \hat{V}_1 y_{p1n} + (\hat{V}_1 - \hat{V}_2) y_{s12} + (\hat{V}_1 - \hat{V}_3) y_{s13} + \dots + (\hat{V}_1 - \hat{V}_n) y_{s1n}$$

$$\hat{I}_1 = (y_{p12} + y_{p13} + \dots + y_{p1n} + y_{s12} + y_{s13} + \dots + y_{s1n}) \hat{V}_1 - y_{s12} \hat{V}_2 - y_{s13} \hat{V}_3 + \dots - y_{s1n} \hat{V}_n \quad (2.17)$$

$$\hat{I}_1 = Y_{11} \hat{V}_1 + Y_{12} \hat{V}_2 + Y_{13} \hat{V}_3 + \dots + Y_{1n} \hat{V}_n \quad (2.18)$$

Dimana :

$$Y_{11} = y_{p12} + y_{p13} + \dots + y_{p1n} + y_{s12} + y_{s13} + \dots + y_{s1n} \quad (2.19)$$

= jumlah semua admitansi yang dihubungkan dengan rel 1

$$Y_{12} = -y_{s12}; Y_{13} = -y_{s13}; Y_{1n} = -y_{s1n} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.21) dapat disubstitusikan ke Persamaan (2.5) menjadi Persamaan (2.22), yaitu :

$$\hat{I}_1 = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \hat{V}_j \quad (2.21)$$

$$P_1 - jQ_1 = \hat{V}_1^* \hat{I}_1 = \hat{V}_1^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \hat{V}_j \quad (2.22)$$

$$P_i - jQ_i = \hat{V}_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \hat{V}_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.23)$$

Persamaan (2.23) merupakan representasi persamaan aliran daya yang *nonlinear*. Untuk sistem n-rel, seperti Persamaan (2.15) dapat dihasilkan Persamaan (2.24), yaitu :

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \vdots \\ \hat{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \\ \vdots \\ \hat{V}_n \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Notasi matrik dari Persamaan (2.24) adalah :

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.25)$$

Dimana :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} = \text{matrik rel admitansi} \quad (2.26)$$

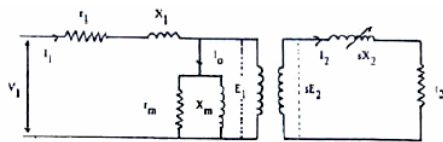
2.2. Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (ac) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi pada dasarnya mempunyai 3 bagian penting seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.3 sebagai berikut

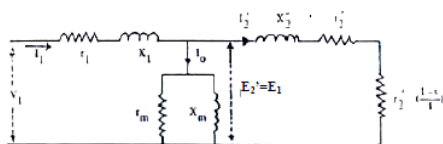
1. Stator : Merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya.
2. Celah : Merupakan celah udara. Tempat berpindahnya energi dari stator ke rotor.
3. Rotor : Merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan

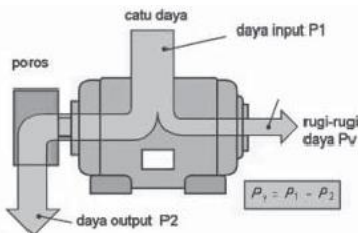
rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator. Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi. Bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun. Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slotslotnya yang dililitkan pada sejumlah kutup tertentu. Jumlah kutup ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang diinduksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutup akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan putar medan stator dan sebaliknya. Kecepatan berputarnya medan putar ini disebut kecepatan sinkron.



Gambar 2. 8 Rangkaian ekivalen motor induksi 3-fasa perfasa



Gambar 2. 9 Rangkaian ekivalen dengan rotor disesuaikan terhadap stator



Gambar 2. 10 Daya dan rugi-rugi daya pada motor induksi

Daya input dari motor 3 fasa adalah:

$$P_{in(3ph)} = \sqrt{3}V_{ll}I_l \cos \phi \quad (2.27)$$

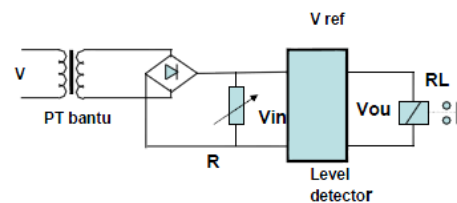
2.3. Voltage Relay

Relai tegangan lebih [*Over Voltage Relay*] bekerjanya berdasarkan kenaikan tegangan yang melebihi settingan *relay* yang digunakan dan *relay* tegangan kurang (*Under Voltage Relay*) bekerjanya berdasarkan turunnya tegangan mencapai/ dibawah nilai settingan *relay* yang digunakan. *Relay* tegangan lebih banyak digunakan untuk:

1. Gangguan fasa ketanah atau pergeseran titik netral pada jaringan yang disuplay dari transformator tenaga dimana titik netralnya ditanahkan melalui tahanan tinggi atau mengambang .
2. Untuk pengaman gangguan fasa ke tanah dari stator generator dimana titik netral generator ditanahkan lewat transformator distribusi
3. Untuk mengamankan putaran lebih pada generator, karena kalau terjadi putaran lebih (naik) pada generator maka tegangan akan menjadi naik pula

Relay tegangan kurang digunakan untuk:

1. Untuk mencegah starting motor bila tegangan yang digunakan turun.
2. Pengaman sistem yang dapat dikombinasikan dengan *relay* frekuensi kurang.



Gambar 2. 11 Prinsip kerja *relay* tegangan lebih statik

Prinsip kerja *relay* elektronik ditunjukkan gambar di atas. Bila tegangan input (V_{in}) lebih besar dari tegangan level detector (V_{ref}) maka akan muncul tegangan output, karena adanya tegangan output ini (V_{out}) maka *relay* RL akan menutup kontaknya. Untuk pengaturan *relay* dengan penundaan waktu, maka pada rangkaian diatas dapat ditambahkan rangkaian timer. Pada prinsipnya *relaya* tegangan ini hampir sama dengan *relay* arus perbedaannya adalah pada penempatan *relay* ini.

2.4. Shunt Capacitor

Salah satu jenis kapasitor dari beberapa jenis kapasitor yakni kapasitor daya frekuensi 50 atau 60 Hz, ini merupakan jenis kapasitor yang kembali terdiri dari tiga jenis, yakni kapasitor *shunt*, seri, dan penyalap. Kapasitor *shunt* digunakan untuk kompensasi beban induktif dan untuk pengaturan tegangan ujung transmisi. Kapasitor seri digunakan transmisi daya yang sangat panjang untuk mengkompensasi reaktansi induktif transmisi.

Kapasitor penyadap digunakan untuk menyadap daya dari jaringan tegangan tinggi untuk keperluan daya yang tidak begitu besar. Kapasitor pada sistem daya listrik menimbulkan daya reaktif untuk memperbaiki tegangan dan faktor daya, karenanya menambah kapasitor sistem akan mengurangi kerugian. Dalam kapasitor seri daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus beban, sedang pada kapasitor paralel sebanding dengan kuadrat tegangan. Pemasangan peralatan kapasitor seri dan paralel pada jaringan distribusi mengakibatkan losses akibat aliran daya reaktif pada saluran dapat dikurangi sehingga kebutuhan arus menurun dan tegangan mengalami kenaikan sehingga kapasitas sistem bertambah.

Manfaat penggunaan kapasitor paralel:

1. mengurangi kerugian
 2. memperbaiki kondisi tegangan
 3. mempertinggi kapasitas pembebanan jaringan
- Kapasitor paralel membangkitkan daya reaktif negatif dan beban membangkitkan daya reaktif positif jadi pengaruh dari kapasitor adalah untuk mengurangi aliran daya reaktif di dalam jaringan sehingga daya reaktif yang berasal dari sistem menjadi

$$Q_2 \text{ (total)} = Q_1 \text{ (beban)} - Q_c.$$

Q_c adalah daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor paralel. Pengaruh Kapasitor *shunt* pada jaringan listrik yakni kapasitor ini terhubung paralel pada jaringan maupun langsung pada beban, dengan tujuan untuk perbaikan faktor daya, sebagai pengatur tegangan maupun untuk mengurangi kerugian daya dan tegangan pada jaringan (Deshpande, 1990). Dengan anggapan tegangan sisi beban dipertahankan konstan, maka terlihat bahwa dengan menggunakan kapasitor *shunt*, maka arus reaktif yang mengalir pada saluran akan berkurang. Hal ini menyebabkan berkurangnya penurunan tegangan pada saluran, sehingga diperlukan tegangan sumber yang tidak berbeda jauh dengan tegangan terima. Berkurangnya arus reaktif yang mengalir pada saluran akan memberikan penurunan rugi-rugi daya dan rugi-rugi energy. Keuntungan lain dari pemasangan kapasitor adalah perbaikan faktor daya dan pengurangan kVA yang mengalir pada jaringan. Dengan pemasangan kapasitor akan mengurangi daya reaktif yang mengalir pada jaringan, sehingga dengan daya nyata yang sama, maka faktor daya akan lebih besar dan kVA akan berkurang. Dengan adanya perbaikan faktor daya, akan timbul pengurangan kVA yang mengalir pada jaringan. Sehingga pada jaringan tersebut dapat ditambahkan sejumlah kVA sebesar pengurangan kVA yang terjadi. Tambahan kVA ini merupakan selisih antara kVA sebelum dipasang kapasitor dengan kVA setelah dipasang kapasitor. Aplikasi dari kapasitor *shunt* pada jaringan distribusi primer radial memberikan keuntungan secara ekonomis baik dari segi kegunaan maupun pelayanan. Secara

umum salah satu keuntungan dari pemasangan kapasitor adalah penurunan kVA pada gardu induk.

2.5. Tap changer Transformator

Tap changer adalah alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan / primer yang berubah-ubah. Untuk memenuhi kualitas tegangan pelayanan sesuai kebutuhan konsumen (PLN Distribusi), tegangan keluaran (sekunder) transformator harus dapat dirubah sesuai keinginan. Untuk memenuhi hal tersebut, maka pada salah satu atau pada kedua sisi belitan transformator dibuat tap (penyadap) untuk merubah perbandingan transformasi (rasio) trafo. Ada dua cara kerja *tap changer*:

1. Mengubah tap dalam keadaan trafo tanpa beban. *Tap changer* yang hanya bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban, disebut “*Off Load Tap changer*” dan hanya dapat dioperasikan manual
2. Mengubah tap dalam keadaan trafo berbeban. *Tap changer* yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator, dalam keadaan transformator berbeban, disebut “*On Load Tap changer* (OLTC)” dan dapat dioperasikan secara manual atau otomatis

Transformator yang terpasang di gardu induk pada umumnya menggunakan *tap changer* yang dapat dioperasikan dalam keadaan trafo berbeban dan dipasang di sisi primer. Sedangkan transformator penaik tegangan di pembangkit atau pada trafo kapasitas kecil, umumnya menggunakan *tap changer* yang dioperasikan hanya pada saat trafo tenaga tanpa beban.

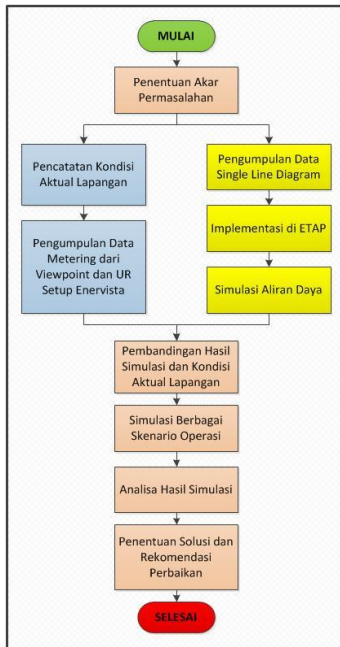
OLTC terdiri dari :

1. Selector Switch
2. diverter switch
3. transisi resistor

Untuk mengisolasi dari bodi trafo (tanah) dan meredam panas pada saat proses perpindahan tap, maka OLTC direndam di dalam minyak isolasi yang biasanya terpisah dengan minyak isolasi utama trafo (ada beberapa trafo yang compartemennya menjadi satu dengan main tank). Karena pada proses perpindahan hubungan tap di dalam minyak terjadi fenomena elektrik, mekanis, kimia dan panas, maka minyak isolasi OLTC kualitasnya akan cepat menurun, tergantung dari jumlah kerjanya dan adanya kelainan di dalam OLTC

3. METODOLOGI

Pada penugasan ketiga ini penulis menggunakan pendekatan secara ilmiah. Metodologi penelitian yang digunakan ditunjukkan pada diagram alir di gambar 3.1 dan dijelaskan pada uraian di bawahnya.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

- **Penentuan Akar Permasalahan.** Sebelum memulai penelitian, penulis harus menentukan akar permasalahan dari tema yang diangkat. Akar permasalahan dari pengangkatan tema penelitian seperti yang sudah dijelaskan pada latar belakang di Bab I. Setelah menentukan akar permasalahan, selanjutnya penulis menyusun strategi untuk memecahkan masalah.
- **Pencatatan Kondisi Aktual Lapangan.** Penulis mencatat kondisi aktual di lapangan untuk memastikan permasalahan memang ada dan penting untuk segera diselesaikan. Data lapangan yang dicari meliputi nilai tegangan di bus terkait, aliran daya kondisi aktual, dan data lain yang berhubungan dan sekiranya berguna untuk penelitian.
- **Pengumpulan Data Metering dari Viewpoint dan UR Setup Enervista.** Penulis dibantu karyawan di unit kerja PL RKC1-2 mengumpulkan data metering kondisi aktual. Pembacaan metering dilihat dari Viewpoint dan UR Setup Enervista. Pengamatan dilakukan pada berbagai skenario operasi.
- **Pengumpulan Single line diagram.** Data *single line diagram* sangat dibutuhkan untuk membuat simulasi di *software* ETAP 12.6. *Single line diagram* ini berisi juga parameter dan spesifikasi tiap peralatan sampai level *medium voltage*.
- **Implementasi di ETAP.** Data *single line diagram* dan parameter peralatan yang didapat kemudian diimplementasikan di *software* ETAP 12.6. *Software* ETAP 12.6 dapat digunakan untuk berbagai simulasi

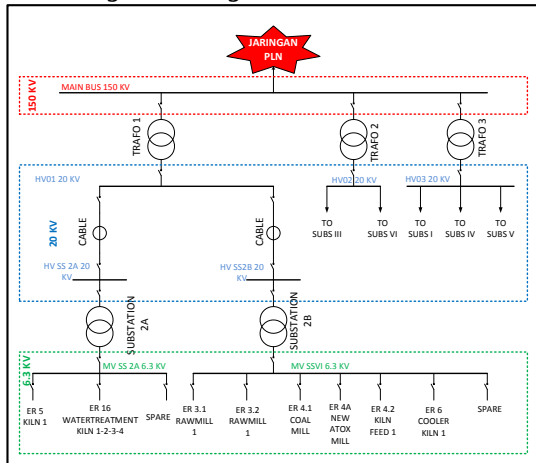
yang terkait dengan sistem tenaga. Di dalam penelitian ini penulis menggunakan salah satu fitur yang terdapat di ETAP 12.6 yaitu simulasi aliran daya.

- **Simulasi Aliran Daya.** Salah satu jenis simulasi yang ada di ETAP 12.6 adalah simulasi aliran daya. Simulasi aliran daya dapat digunakan untuk melihat seperti apa aliran daya pada sistem. Dari hasil simulasi nantinya dapat diketahui aliran daya aktif (P), daya aktif (Q), nilai tegangan tiap bus, besar arus dan sudut dayanya, serta besaran lain yang dibutuhkan untuk analisis.
- **Pembandingan Hasil Simulasi dengan Kondisi Aktual Lapangan.** Langkah ini digunakan untuk memastikan data yang digunakan di *software* ETAP 12.6 sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Memang hasil simulasi tidak akan bisa sama persis dengan kondisi aktual. Tetapi perbedaan antara keduanya tidak boleh terlalu jauh. Seperti kita ketahui sistem tenaga listrik adalah sistem yang dinamis, sehingga kondisi lapangan bisa berubah sewaktu-waktu sesuai operasi pabrik pada saat itu. Maka dari itu perbedaan antara hasil simulasi dan kondisi aktual bisa dimaklumi asal tidak terlalu jauh dan masih bisa ditoleransi.
- **Simulasi Berbagai Skenario Operasi.** Setelah data yang digunakan untuk simulasi dirasa cukup valid dan mampu merepresentasikan kondisi aktual lapangan, selanjutnya simulasi dilakukan dengan merubah kondisi operasi menjadi berbagai macam skenario. Skenario-skenario operasi yang dibuat adalah skenario operasi yang mungkin terjadi di lapangan dan dapat digunakan untuk membantu analisa.
- **Analisis Hasil Simulasi.** Hasil simulasi seluruh skenario kemudian dianalisa untuk menentukan solusi dari permasalahan.
- **Penentuan Solusi dan Rekomendasi Perbaikan.** Dari hasil analisa didapatkan solusi dan rekomendasi untuk menyelesaikan permasalahan.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Kondisi Aktual Lapangan

4.1.1. Single line diagram



Gambar 4. 1 Single line diagram pabrik Tuban 1

Gambar di atas adalah single line diagram dari pabrik Tuban 1. Mainsubstation 1 secara umum melayani pabrik Tuban 1. Suplai daya diperoleh dari jaringan PLN 150 kV. Di mainsubstation tegangan diturunkan menjadi 20 kV. Terdapat tiga buah trafo daya di mainsubstation 1. Sistem distribusi menggunakan jaringan radial. Trafo 1 atau disebut juga line satu menyuplai daya untuk substation 2. Substation 2 melayani area RKC Tuban 1. Trafo 1 atau disebut juga line satu menyuplai daya untuk substation 2A dan substation 2B. Substation 2A melayani area Kiln Tuban 1, ER 5, dan ER 16. Substation 2B melayani area Raw Mill Tuban 1, Kiln Feed Tuban 1, New Atox Mill Tuban 1, Coal Mill Tuban 1 dan Cooler Tuban 1. Trafo 3 atau disebut juga line tiga menyuplai daya untuk substation I, substation IV, dan substation V yang melayani area RKC Tuban 2, Crucher, dan Perkantoran. Pada penelitian kali ini fokus bahasan adalah line 1 yang melayani area Kiln, Rawmill tuban 1. Line 1 terhubung dengan dua substation, yaitu substation 2A dan substation 2B. Masing-masing substation melayani beberapa ER (Electrical Room).

- Substation 2A
 - ER 5 Kiln 1 Tuban 1
 - ER 16 Water Treatment Tuban 1, 2, 3, 4
- Substation 2B
 - ER 3.1 Rawmill 1 Tuban 1
 - ER 3.2 ID Fan 4-5 Rawmill Tuban 1
 - ER 4.1 Coalmill Tuban 1
 - ER 4.2 Kiln Feed Tuban 1
 - ER 4A New Atoxmill Tuban 1
 - ER 6 Cooler Tuban 1

4.1.2. Aliran Daya dan Performa Tegangan

Pada kondisi aktual saat ini, terjadi perbedaan di tegangan di sisi *medium voltage* antara subs 2A dan subs 2B. Beda tegangan antara dua substation yang berasal dari satu sumber, yaitu line 1, menjadi isu

yang hangat diperbincangkan. Perbedaan tegangan ini merupakan sebuah kerugian bagi operasi sistem tenaga listrik karena pengendalian nilai tegangan menjadi lebih sulit. Seperti kita ketahui, pengendalian tegangan berada di mainsubstation dengan cara merubah posisi *tap changer* trafo. Dalam hal ini pengendalian tegangan di sisi substation 2A dan substation 2B dilakukan dengan merubah posisi *tap changer* trafo 1. Pada saat mengubah posisi *tap changer* trafo 1, operator mainsubstation harus memperhatikan tegangan di sisi *medium voltage* subs 2A dan subs 2B. Pada prakteknya yang dilihat oleh operator adalah tegangan di ER 5 dan ER 3 karena nilai tegangan di sisi MV substation hampir sama dengan nilai tegangan ER yang tersambung. Pada penelitian kali ini dilakukan pengamatan nilai tegangan untuk beberapa kondisi operasi. Pengamatan tegangan dilakukan baik melalui pembacaan langsung di lapangan dengan cara membaca metering di substation dan ER, melalui *UR Setup Enervista*, maupun melalui *Viewpoint Enervista*. Dari beberapa kali pengamatan, memang benar bahwa perbedaan tegangan antara dua substation ini konsisten terjadi. Di dalam makalah ini akan ditampilkan contoh hasil pengamatan tegangan pada dua kondisi operasi yang berbeda. Data yang ditampilkan adalah hasil pengamatan menggunakan *data Setup Enervista*.

4.1.3. Tap changer Trafo 1 Mainsubstation

Tap changer trafo 1 mainsubstation digunakan untuk mengatur tegangan sumber substation 2A dan substation 2B. *Tap changer* di sisi mainsubstation bisa dirubah pada kondisi berbeban (*online*). Perubahan posisi tap sama artinya merubah perbandingan belitan. Trafo 1 substation mempunyai kemampuan tapping yang cukup baik. Ada 17 posisi tap yang dapat digunakan. Berikut ini adalah *nameplate* dari trafo 1 mainsubstation yang memuat data tapping trafo. Tap trafo berada di sisi tegangan tinggi karena arus di sisi HV (*High Voltage*) lebih rendah. Arus tinggi saat penggantian posisi tap berbahaya karena dapat menimbulkan percikan bunga api yang lebih besar. Jika kita lihat dari *nameplate* di atas, trafo 1 mainsubstation mempunyai kemampuan tap positif dan tap negatif. Tegangan keluaran yang diharapkan dari trafo yaitu 20 kV. Apabila tegangan dari PLN masih berada pada range 135 kV – 165 kV maka trafo masih mampu memberikan output tegangan sebesar 20 kV. Itu artinya trafo dapat menghasilkan tegangan sekunder yang relatif stabil meskipun tegangan sumber dari jaringan PLN berubah-ubah.

4.1.4. Tap changer Trafo Substation 2A dan Substation 2B

Hipotesis penulis terhadap permasalahan perbedaan tegangan adalah posisi *tap changer* yang tidak sama antara trafo substation 2A dan trafo substation 2B. Oleh karena itu penulis melakukan pengamatan langsung ke lapangan untuk melihat

posisi *tap changer* secara aktual. Berikut ini adalah gambar hasil pengamatan di lapangan. Posisi *tap changer* dari trafo substation 2B berada di posisi 3. Perbandingan *ratio* tegangan pada posisi tersebut adalah 20000:6300. Apabila sisi primer trafo diberi sumber tegangan 20 kV maka sisi sekunder akan mengeluarkan tegangan sebesar 6,3 kV. Sebuah trafo diposisikan seperti ini apabila dikehendaki tegangan output sebesar tegangan nominal tetapi tegangan inputnya berada di bawah tegangan nominal. Efek dari tap trafo 2A di posisi 5 adalah jika tegangan input trafo berada pada nilai nominal 20 kV maka tegangan outputnya akan lebih tinggi dari tegangan nominal. Dari pengamatan di lapangan, posisi *tap changer* tidak bisa dilihat karena trafo tidak dilengkapi alat indikasi pembacaan seperti di trafo substation 2B. Untuk melihat posisi tap, seseorang harus naik ke atas trafo secara langsung. Hal tersebut tentunya cukup berbahaya mengingat tegangan kerja trafo adalah tegangan tinggi yang dapat menyebabkan kecelakaan fatal apabila tidak berhati-hati.

4.1.5. Pengecekan Performa Kapasitor

Kapasitor adalah penyuplai daya reaktif (Q) bagi sistem tenaga listrik. Keberadaan kapasitor berfungsi untuk memperbaiki tegangan dan faktor daya. Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu adalah sebagai berikut. $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ Apabila kapasitor dipasang di bus beban maka daya reaktif yang diserap beban akan disuplai oleh kapasitor. Maka daya semu yang mengalir dari sumber akan berkurang. Dengan begitu maka daya yang mengalir adalah daya aktif. Efek dari pemasangan kapasitor adalah faktor daya akan naik. Selain itu, berkurangnya daya semu akan berpengaruh pada berkurangnya *magnitude* arus. Berkurangnya *magnitude* arus akan mengurangi drop tegangan pada saluran. Akibatnya, tegangan di bus akan naik. Besarnya kenaikan tegangan bergantung pada besarnya daya reaktif yang disuplai kapasitor.

4.1.6. Perhitungan kompensasi faktor daya

Setelah mengetahui pemakaian daya reaktif perbulan, maka kita bisa menghitung besar kompensasi. Hasil perhitungan ini sebagai bahan pertimbangan untuk menentukan besarnya penghematan.

Pemakaian perbulan :

$$= 24 \text{ jam/hari} \times 30 \text{ hari} \times 93000 \text{ kW}$$

$$= 66.960 \text{ Mwh}$$

$$\text{Batas kVArh yang dibebaskan dari PLN} : = 0,62 \times 66.960 \text{ Mwh}$$

$$= 41.515.200 \text{ kVarh}$$

□ Perhitungan setelah kompensasi :

Misal menginginkan faktor daya sebesar 0,99: $\cos \phi = 0,99$ $\tan \phi = 0,17$

$$\text{Daya reaktif terpakai} = \text{Daya Beban} \times \tan \phi$$

$$= 93000 \times 0,17 = 15.810 \text{ kVar}$$

Maka, kita dapat menghitung pemakaian daya reaktif per bulan adalah :

$$15.8120 \text{ kVar} \times 24 \text{ jam/hari} \times 30$$

$$= 11.383.200$$

Besar daya reaktif :

$$= 11.383.200 - 41.515.200$$

karena hasil yang diperoleh negatif, maka tidak perlu membayar denda *power factor penalty*[12]

Perhitungan diatas merupakan hasil asumsi dari tarif tenaga listrik untuk keperluan industri yang berlaku mulai 1 oktober 2013 menurut Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor 30 Tahun 2012.

4.1.7. Analisis perhitungan kapasitas kapasitor bank

Adapun kita bisa menghitung daya reaktif (kVar) oleh kapasitor bank. Data yang diperlukan antara lain adalah daya aktif (kW), power faktor lama ($\cos \theta_1$) dan power faktor baru ($\cos \theta_2$). Daya yang diperoleh dari persamaan :

$$S = P / \cos \theta_1 \text{ keterangan : } S = \text{Daya nyata (kVA)}$$

$$P = \text{Daya aktif (kW)} \text{ Daya reaktif dari pf lama dan pf baru diperoleh dari persamaan : } QL = P \tan \theta_1$$

$$QB = P \tan \theta_2$$

$$\text{keterangan : } QL = \text{Daya reaktif lama (kVAR)} \quad QB = \text{Daya reaktif baru (kVAR)}$$

Daya reaktif yang dikompensasi oleh Kapasitor bank adalah : $QC = QL - QB$

Keterangan : QC = Daya yang dikompensasi kapasitor (kVAR)

Contoh perhitungan :

Data yang diketahui : Daya aktif 93 MW,

Tegangan 20 kV, 3 Phasa, 50 Hz.

$\cos \theta_1 = 0.85 \text{ lag}$, $\cos \theta_2 = 0.99 \text{ lag}$ Perhitungan :

$$\cos \theta_1 = 0.85 \text{ ---- } \tan \theta_1 = 0,14$$

$$\cos \theta_2 = 0.99 \text{ ---- } \tan \theta_2 = 0,17$$

maka :

$$QC = QL - QB$$

$$QC = P [\tan \theta_1 - \tan \theta_2]$$

$$QC = 93 \times 10^6 [0,14 - 0,17]$$

$$QC = 12,85 \text{ MVAR} = 12850 \text{ kVar}$$

Dari hasil perhitungan , maka dalam simulasi pemasangan kapasitor bank akan dipasang sebesar 12850 kVar dengan menggunakan 6 step di simulasikan pada jaringan 20 kV atau 6 kV.

4.1.8. VT Ratio Sisi HV Subs 2A dan Subs 2B

Terdapat dua nilai yang berbeda pada pembacaan nilai tegangan di sisi HV Substation. Setelah dilakukan analisis ternyata terjadi kesalahan nilai VT *Ratio* di Multilin F35 pada sisi HV Subs 2A dan Subs 2B. Nilai VT *ratio* seharusnya 20.000:110 atau sama dengan 181,82:1. Tetapi nilai yang dimasukkan adalah 200:1. Hal tersebut membuat pembacaan nilai tegangan lebih tinggi.

Untuk itu perlu dilakukan perubahan nilai VT *ratio* dari 100:1 menjadi 181,82 pada F35 Subs 2A dan subs 2B supaya pembacaan nilai tegangan valid.

4.2. Penentuan Posisi Tap Trafo Substation 2B

Posisi *tap changer* trafo substation 2B harus ditentukan terlebih dahulu sebelum melakukan

analisa perbaikan. Mengingat pengamatan di lapangan tidak memungkinkan untuk dilakukan karena *unsafe condition*, maka penentuan tap dilakukan menggunakan simulasi ETAP. Dengan menggunakan simulasi ETAP kita bisa merubah posisi tap tanpa membahayakan operasi pabrik.

Langkah penentuan *tap changer* trafo substation 2B menggunakan simulasi ETAP dijabarkan pada subbab-subbab di bawah ini.

4.2.1. Analisa Beban Trafo Substation 2B

Misalkan data dari sebuah trafo distribusi sbb. :

Daya : 30 MVA

Tegangan Kerja : 21/20,5/20/19,5/19 kV // 6.3 kV

Arus : 824,8 A – 2749,4 A

In dan Rn : 118,6 A dan 0,6842 Ohm

IG dan RG : 62,1 A dan 3,8 Ohm

Hubungan : Dyn5

Impedansi : 9,07%

Trafo : 1 x 3 fasa

Sehingga dapat dihitung sbb:

$S = 30 \text{ MVA} = 30000000 \text{ VA}$

$V = 6300 \text{ kV fasa - fasa}$

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{30000000}{\sqrt{3} \times 6300} = \frac{30000000}{10899} = 2752,5$$

Ampere

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{5.5041 + 5.504 + 5.504}{3} = 2201,6$$

Ampere

Persentase Pembebanan trafo adalah :

$$\frac{I_{rata}}{I_{FL}} = \frac{2201,6}{2752,5} = 79,9\%$$

Dari perhitungan di atas terlihat bahwa pada (WBP = Waktu Beban Puncak) persentase pembebanan yaitu 79,9 %.

4.2.2. Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Trafo Substation 2B

Dengan menggunakan persamaan, koefisien a, b, dan c dapat diketahui besarnya, dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata (Irata).

$$I_R = a \cdot I \text{ maka : } a = \frac{I_R}{I} = \frac{5504,1}{2201,6} = 2,50$$

$$I_S = b \cdot I \text{ maka : } b = \frac{I_S}{I} = \frac{5504}{2201,6} = 2,50$$

$$I_T = c \cdot I \text{ maka : } c = \frac{I_T}{I} = \frac{5504}{2201,6} = 2,50$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian, rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$\begin{aligned} &= \frac{([a-1]+[b-1]+[c-1])}{3} \times 100\% \\ &= \frac{([2,50-1]+[2,50-1]+[2,50-1])}{3} \times 100\% \\ &= 150\% \end{aligned}$$

4.2.3. Implementasi Sistem di ETAP

Sistem tenaga listrik yang berhubungan dengan line 1 mainsubstation digambar di ETAP. Semua parameter dimasukkan sesuai kondisi aktual lapangan. Komponen yang dimasukkan mulai dari sumber 150 kV PLN sampai dengan beban di tegangan menengah ER. Berikut ini adalah penampakan *single line diagram* sistem yang sudah dibuat di *software* ETAP.

4.2.4. Membandingkan Hasil Simulasi dengan Kondisi Real Lapangan

Pada subbab 4.1.2 telah ditampilkan dua contoh hasil pengamatan aliran daya. Ada dua kondisi operasi yang ditampilkan, yaitu kondisi Rawmill *running* semua *capacitor* ON dan kondisi semua Rawmill *standby* dan *capacitor* CX 302 DAN CX 403 OFF. Hasil pengamatan tersebut akan digunakan sebagai patokan untuk membandingkan hasil simulasi ETAP. Simulasi dilakukan dengan mencoba merubah tap trafo sesuai *nameplate*. Ada lima posisi tap yang mungkin. Masing-masing posisi tap dicoba dan disimulasikan. Supaya hasil bisa dibandingkan maka tegangan sumber yaitu bus HV01 20 kV mainsubstation harus disamakan antara aktual dan simulasi. Dari hasil simulasi kemudian dilihat posisi tap mana yang paling mendekati pembacaan aktual. Untuk meyakinkan bahwa hasil simulasi benar maka simulasi dilakukan pada dua kondisi operasi. Tabel 4.1 dan 4.2 adalah tabel hasil perbandingan nilai tegangan aktual dan hasil simulasi.

4.2.5. Menyimpulkan Nilai Tap Trafo Substation 2B

Dari lima posisi tap yang coba disimulasikan posisi tap 4 menghasilkan nilai yang paling mendekati nilai aktual. Dari analisa simulasi di atas dapat disimpulkan bahwa posisi tap trafo substation 2B saat ini berada di posisi 4.

4.3. Analisis Perbaikan Menggunakan Simulasi ETAP

Tegangan nominal *medium voltage* adalah 6,3 kV. Kalau dilihat dari data pengamatan, tegangan kerja substation 2 trafo 2B masih jauh dari nilai 6,3 kV. Tegangan kerja sebesar 6,05 kV sebanding dengan 96% tegangan nominal. Memang benar peralatan masih mentolerir nilai tersebut. Akan tetapi sebenarnya hal tersebut tidak terlalu bagus untuk operasi peralatan. Apalagi mayoritas beban di pabrik adalah motor. Motor adalah salah satu jenis beban dengan karakteristik mempunyai daya konstan. Apabila motor dioperasikan pada tegangan di bawah tegangan nominalnya maka arus yang dibutuhkan lebih tinggi dibandingkan arus nominal. Nilai arus yang lebih besar dari arus nominal ini apabila dibiarkan dapat membuat peralatan cepat rusak. Derating factor peralatan bisa lebih besar sehingga life time atau usia pakai dari peralatan menjadi lebih pendek. Tegangan dapat dinaikkan dengan dua cara. Pertama dengan menambahkan *shunt* kapasitor sebagai kompensator daya reaktif.

Kedua dengan menaikkan tegangan sumber. Cara pertama yaitu menambahkan *shunt capacitor* sudah dilakukan. Akan tetapi efeknya terhadap perbaikan tegangan tidak terlalu besar. *Shunt capacitor* berfungsi untuk mereduksi *magnitude* arus yang diakibatkan oleh beban reaktif. Dengan berkurangnya nilai *magnitude* arus diharapkan drop tegangan tidak terlalu besar. Akan tetapi hal ini tidak terlalu berpengaruh besar karena efek drop *voltage* di jaringan distribusi pabrik tidak terlalu besar mengingat tidak ada kabel atau branch yang panjang. Cara kedua yaitu menaikkan tegangan sumber. Naik turunnya tegangan sumber dilakukan di mainsubstation dengan merubah *tap changer* trafo secara *online*. Akan tetapi apabila *tap changer* trafo dirubah untuk menaikkan tegangan di substation 2B secara otomatis tegangan di substation 2A juga akan ikut naik. Hal itu terjadi karena substation berasal dari sumber yang sama dan mempunyai konfigurasi jaringan radial. Apabila tegangan subs 2A naik, hal tersebut akan membahayakan peralatan. Saat ini tegangan kerja subs 2A berada pada 98-99% tegangan nominal. Apabila tegangan naik maka tegangan peralatan akan berada di atas tegangan nominal. Hal tersebut dapat menyebabkan kerusakan isolasi akibat *overvoltage*. Maka dari itu tegangan antara substation 2A dan substation 2B perlu disamakan supaya pengaturan tegangan sumber lebih mudah dilakukan. Apabila substation mempunyai nilai tegangan yang tidak jauh berbeda maka bisa disetting pada nilai tegangan nominalnya sehingga peralatan tidak mudah rusak.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengamatan di lapangan dan analisis menggunakan *software* ETAP dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbedaan tegangan antara bus tegangan menengah substation 2A dan substation 2B konsisten terjadi pada berbagai skenario operasi. Pada kondisi Rawmill *running* dan semua kapasitor ON beda tegangan kurang lebih sebesar 200 V (pengamatan lapangan) atau 250 V (hasil simulasi). Selisih tegangan akan lebih tinggi ketika rawmill tidak beroperasi. Tegangan antara dua substation akan sama ketika rawmill tidak beroperasi dan kapasitor CX 302 dan CX 403 dimatikan.
2. Dari hasil pengamatan di lapangan, posisi *tap changer* trafo substation 2B saat ini berada pada posisi 3. Perbandingan tegangan primer:sekunder trafo saat ini sebesar 19.000:6.300. Posisi *tap changer* trafo substation 2A tidak bisa dilihat langsung di lapangan karena cukup berbahaya untuk dilakukan. Dari analisa hasil simulasi ETAP dan membandingkannya dengan hasil pengamatan metering aktual disimpulkan bahwa posisi *tap changer* trafo substation 2B berada di posisi 4. Perbandingan tegangan primer:sekunder trafo saat ini sebesar 19.500:6.300.
3. Hampir semua kapasitor yang terhubung di substation 2A dan substation 2B berfungsi dengan baik.
4. Solusi terbaik untuk mengatasi ketidakseimbangan antara bus tegangan menengah substation 2A dan substation 2B adalah dengan merubah *tap changer* trafo substation 2B ke posisi 4. Dari hasil analisa simulasi ETAP didapatkan kesimpulan bahwa merubah tap trafo ke posisi 4 lebih baik dibandingkan tetap di posisi 3 seperti kondisi saat ini.

5.2. Saran

Berikut saran dan rekomendasi yang diajukan berkaitan dengan rencana perbaikan dan pengoperasian sistem sebelum maupun sesudah perbaikan.

1. Dilakukan pengecekan posisi tap trafo substation 2B secara aktual di lapangan. Memang benar dari hasil simulasi bisa diketahui bahwa tap trafo berada di posisi 4, tetapi untuk lebih pasti sebaiknya dilakukan pengecekan lapangan. Pengecekan posisi tap trafo di lapangan harus memperhatikan aspek keselamatan kerja.
2. Dilakukan perubahan VT *ratio* di Multilin F35 pada sisi HV substation 2A dan substation 2B dari nilai 200:1 menjadi 181,82:1.
3. Dibuat sistem otomatis untuk start dan stop kapasitor di ER 3, ER 4, ER 5 dan ER 6. Nantinya start dan stop kapasitor bisa dilakukan dari mainsubstation karena operator mainsubstation yang bertanggung jawab mengendalikan tegangan.
4. Perubahan *tap changer* trafo substation 2B sebaiknya dilakukan bersamaan dengan maintenance mainsubstation 1 sehingga downtime akibat listrik bisa ditekan.
5. Operasi sistem sebelum perubahan *tap changer* trafo substation 2B sebaiknya memperhatikan hal-hal berikut.
 - Pada saat rawmill 1 tidak beroperasi sebaiknya kapasitor di ER 3 CX302, dan di ER 4 CX403 juga ikut dimatikan supaya tegangan di substation 2B tidak terlalu tinggi dan menyebabkan *overvoltage*.
6. Operasi sistem setelah perubahan *tap changer* trafo substation 2B menjadi posisi 4 sebaiknya memperhatikan hal-hal berikut.
 - Pada kondisi operasi normal, yaitu Rawmill 1 *running*, tegangan sumber dari trafo 1 mainsubstation sebaiknya dinaikkan sampai tegangan di substation 2A dan substation 2B mendekati nilai nominalnya. Pada kondisi normal tegangan dua substation relatif tidak jauh berbeda.

- Pada saat Rawmill 1 tidak operasi sebaiknya kapasitor di ER 3 CX302 dan di ER 4 CX403 juga ikut dimatikan, tetapi tegangan sumber dinaikkan sampai tegangan di subs 2A dan subs 2B mendekati nilai nominalnya, tidak terlalu tinggi dan menyebabkan *trip overvoltage*..

DAFTAR PUSTAKA

- Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg. *Power Generation Operation and Control*. John Wiley and Sons, Ltd. United States of America. 1996.
- Deny Hamdani. *Pengantar Metodologi Penelitian Panduan Penulisan Tugas Akhir*. Penerbit ITB. Bandung. 2010.
- Department of Plant Performance Improvement. *Studi Kelistrikan Parallel Genset untuk Pembangunan WHRG Tuban*. Semen Indonesia. Tuban. 2015.
- John J Grainger dan William D. Stevenson Jr. *Power System Analysis*. McGraw-Hill. Singapore. 1994.
- Kundur, Prabha. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill. USA. 1994.
- Machowski, Jan, Bialek, Janusz W, Bumby, James R. *Power System Dynamic Stability and Control*. Great Britain. John Wiley and Sons, Ltd. 2008.
- P. M. Anderson dan A. A. Fouad. *Power System Control and Stability*. John Wiley and Sons, Ltd. United States of America. 2003.
- Semen Indonesia. *Annual Report 2014*. Semen Indonesia. Gresik. 2014.
- Semen Indonesia. *Laporan Laba Rugi Semen Indonesia Januari 2015*. Semen Indonesia. Gresik. 2015.
- Semen Indonesia. *Annual Report 2013*. Semen Indonesia. Gresik. 2013.