

# EFEK TRANSISI SHUTDOWN SEMI-AUTOGENOUS MILL DAN 3<sup>rd</sup> C-TYPE HARMONIC FILTER TERHADAP EFISIENSI DISTRIBUSI JARINGAN LISTRIK Studi Kasus : Concentrator Power Distribution 11 kV PTNNT

Andry Saftiawan <sup>1)</sup>, Wiwik Handajadi <sup>2)</sup>, Slamet Hani <sup>3)</sup>

<sup>1</sup> Mahasiswa Teknik Elektro Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta

<sup>2</sup> Dosen Teknik Elektro Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta

<sup>3</sup> Dosen Teknik Elektro Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta

Kampus ISTA Jl. Kalisahak No. 28 Kompleks Balapan Yogyakarta

Telp 0274-563029, Fax 0274-563847,

e-mail : [andry.saftiawan@engineer.com](mailto:andry.saftiawan@engineer.com)

## INTISARI

Penyesuaian nilai evaluasi terhadap perbedaan skenario hipotesis pada sistem distribusi harus pada kondisi pembebanan, karena realita operasi di lapangan tidak selalu sama dengan perencanaan. Dalam kasus-kasus tertentu, seperti penjadwalan shutdown untuk keperluan maintenance kerap kali menimbulkan electrical disturbance yang disebabkan oleh interval waktu antara shutdown (Semi-Autogenous) SAG Mill terhadap harmonik filter (3<sup>rd</sup> C-Type HF). Semenjak pengaruh Cycloconverter tiga fase dari sistem drive SAG Mill yang beroperasi dalam mode steady-state dengan sudut firing yang bervariasi secara terus menerus menghasilkan arus harmonik. Dalam hubungan dengan faktor daya jaringan, perilakunya mirip dengan converter-fed drive DC. Oleh karena itu, komputasi indeks harmonik tiap bus digunakan untuk mengidentifikasi efek transisi shutdown pada tiap interval waktu dan periode berbeda. Simulasi dan pengujian setiap metode migrasi dengan menggunakan software ETAP dan dibandingkan dengan standar praktis yang direkomendasikan untuk pengoperasian distribusi daya listrik untuk pembangkit industri IEEE Std 141-1993, ANSI/IEEE Std 399-1997 dan IEEE Std 519-1992. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distorsi harmonik masih dapat ditolelir. Sedangkan penggunaan 3<sup>rd</sup> C-Type HF sangat membantu untuk memperbaiki efisiensi dan kualitas daya pada Concentrator Power Distribution 11 kV PTNNT.

Kata kunci: THD, efisiensi dan kualitas daya, Shutdown

## Abstract

Evaluation value adjustments for differences hypothetical scenarios on the distribution system should be on the loading condition, because the reality of operations in the field are not always the same with planning. In certain cases, such as scheduling a shutdown for maintenance purposes often cause electrical disturbance caused by the time interval between (Semi-Autogenous) SAG Mill shutdown to the harmonic filter (3<sup>rd</sup> C-Type HF). Since the effect of the three-phase Cycloconverter of SAG Mill drive system that operates in a steady-state mode with a firing angle which varies continuously generate harmonic currents. In relation with network power factor, behavior similar to DC converter-fed drives. Therefore, computational harmonic index every bus is used to identify a transition effect shutdown at each time interval and different periods. Simulation and testing of each migration method using ETAP software and compared with the recommended practical standards for operation of electrical power distribution for industrial plants IEEE Std 141-1993, ANSI/IEEE Std 399-1997 and IEEE Std 519-1992. The research results show that the harmonic distortion still be tolerated. While the use of 3<sup>rd</sup> C-Type HF is very helpful to improve the efficiency and quality of power at 11 kV Power Distribution Concentrator PTNNT.

Keywords: THD, efficiency and power quality, Shutdown

## PENDAHULUAN

Menurut IEEE Std 141-1993, *Maintenance is essential to proper operation*. Sebuah program pemeliharaan preventif dijadwalkan secara rutin adalah faktor yang paling penting dalam menjaga perangkat pelindung dalam kondisi operasi yang diandalkan.

Selama masa *maintenance*, kemungkinan terjadinya kondisi *abnormal* akibat dari transisi *shutdown* sulit untuk dihilangkan. dinamika transisi *shutdown* sebagai pengertian dari pemutusan suplai daya untuk beban tertentu dan pada waktu bersamaan menimbulkan disturbances dalam sistem yang disebabkan oleh komponen nonlinear dan reaktif.

Efek transisi ini timbul akibat sebagai interval waktu pemutusan daya antara GMD (Gearless Mill Drive) terhadap kompoensator daya reaktif dan harmonik, yaitu HF (Harmonic Filter) Orde-3 Tipe-C.

Fluktuasi nilai Total Harmonic Distortion (THD) akibat transisi shutdown akan menjadi bermasalah apabila nilainya melebihi nilai operasi yang direkomendasikan dan disyaratkan untuk kontrol harmonik oleh ANSI/IEEE Std 519.

Faktor daya yang rendah tidak diinginkan untuk utilitas dalam hal efisiensi operasi dan ekonomi. Pada saat yang sama, kehadiran daya reaktif beresilasi melalui jaringan dan peralatan terkait dengan penambahan arus. Sementara daya reaktif seperti tidak dikonsumsi, itu tetap menyebabkan utilitas mengeluarkan biaya, baik dalam bentuk kerugian tambahan dan dalam bentuk kebutuhan kapasitas yang lebih besar. Karena properti menempati jaringan dan peralatan saat melakukan pekerjaan yang tidak berguna, daya reaktif telah disebut sebagai gurauan "kolesterol dari jaringan listrik." (Alexandra von Meier, 2006)

*Load flow analysis* adalah solusi paling komprehensif untuk memprediksi konsekuensi terhadap fluktuasi level pembangkitan dan beban. Menurut Göran Andersson (2004), dalam semua kasus realistis, masalah aliran daya listrik tidak dapat diselesaikan secara analitis, karenanya solusi iteratif yang diimplementasikan ke dalam komputer harus digunakan.

Metode penyelesaian aliran harmonik menggunakan metode Newton-Raphson telah dilakukan dan teknik-teknik ini bervariasi dalam hal kebutuhan data, pemodelan kompleksitas, rumusan masalah dan solusi

algoritma. Metode baru sedang dikembangkan dan diterbitkan. (Nima Bayan, 1993)

Terdapat beberapa acuan yang berisi tentang sebab dan akibat dari munculnya kondisi abnormal dalam sistem tenaga listrik seperti harmonik dan daya reaktif hingga keadaan fatal yaitu *blackout*, diadopsi dari penelitian terdahulu, baik berupa tesis, disertasi dan laporan penelitian yang berisi fitur informasi. Adopsi nuansa makna khusus yang diacu dan digunakan dalam penulisan laporan penelitian ini, yang dikutip baik esensinya maupun statement lengkapnya, di antaranya sebagai berikut :

- a) IEEE Std 141-1993 (1993), *Maintenance is essential to proper operation*, yaitu pemeliharaan adalah penting untuk operasi yang tepat. Instalasi harus didesain sehingga perawatan dapat dilakukan dengan personil pemeliharaan yang biasanya tersedia (baik in-house atau kontrak). Rincian desain harus menyediakan ruang yang tepat, aksesibilitas, dan kondisi kerja sehingga sistem dapat dipertahankan tanpa kesulitan dan biaya yang berlebihan..
- b) Wiwik Handajadi (2015), meningkatnya daya reaktif induktif pada suatu sistem mengakibatkan terjadinya rugi tegangan. Terjadinya rugi tegangan pada penyaluran daya listrik akan berpengaruh terhadap besarnya susut energi (losses). Dalam prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) mengenai perbaikan tegangan dengan pemasangan komponen kapasitif, menyimpulkan, bahwa dengan pemasangan *Capasitor Bank* pada bus maka terjadi pengurangan rugi-rugi daya nyata dan pengurangan rugi-rugi daya dengan menggunakan kapasitor bank merupakan sebuah solusi alternatif untuk memperbaiki profil tegangan pada sub sistem dan untuk mengurangi rugi-rugi total pada sistem keseluruhan.
- c) Federal Energy Regulatory Commission (2005), daya reaktif yang tidak memadai telah menyebabkan runtuh tegangan dan telah menjadi penyebab utama beberapa padaman besar baru-baru ini di seluruh dunia. Dan ketika blackout pada Agustus 2003 di Amerika Serikat dan Kanada bukan karena jatuhnya tegangan sebagai istilah yang telah secara tradisional digunakan, laporan akhir dari U.S-Canada Power System Task Force Outage (April 2004) mengatakan bahwa "daya reaktif yang tidak cukup adalah masalah dalam

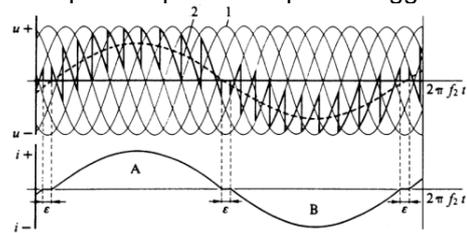
*blackout*". Dinamika pasokan daya reaktif kapasitif yang kelelahan di periode yang mengarah ke *blackout*.

- d) Wiwik Handajadi (2014), harmonik akan mengakibatkan menurunkan power factor (PF) yang berdampak efisiensi distribusi menurun, hal ini disebabkan faktor daya yang rendah.
- e) Nima Bayan (1999), melakukan penelitian tentang studi kasus analisa aliran harmonik di Kautex-Textron Windsor Plant dan Windsor Casino, mengatakan, bahwa selama pengukuran, serangkaian masalah lainnya terkait harmonik, seperti suhu tinggi yang berlebihan di transformator penyulang, melelehnya isolasi kumparan kontaktor, pemanasan kabel distribusi daya dan jatuh tegangan berlebihan dan efek tambahan karakteristik gelombang tegangan dan arus karena harmonik. Dan harmonik digunakan untuk mengukur distorsi dalam gelombang tegangan dan arus pada berbagai titik dalam sistem daya listrik dan untuk menentukan apakah kondisi resonansi berbahaya ada dan bagaimana mereka mungkin dikurangi.
- f) Ryszard Klempka dkk (2013), salah satu metode yang paling umum untuk mencegah efek samping dari beban nonlinier pada jaringan listrik adalah penggunaan filter pasif. Sebelum skema filter ditentukan, studi faktor daya harus dilakukan untuk menentukan apakah persyaratan kompensasi reaktif yang diperlukan. Jika koreksi faktor daya tidak diperlukan, maka filter daya minimum dapat dirancang; salah satu yang dapat menangani arus dan tegangan fundamental dan harmonik tanpa pertimbangan untuk output daya reaktif.

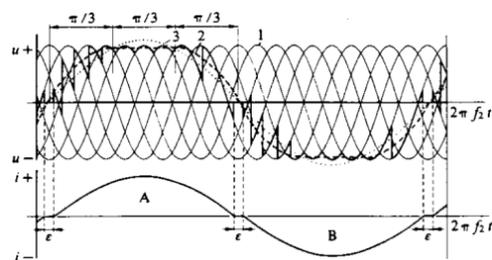
### **Kajian Harmonik SAG Mill**

Dalam sistem distribusi listrik industri, penggunaan komponen-komponen pengubah tegangan dari AC ke DC atau sebaliknya akan banyak ditemukan, mengingat karakteristik dan jenis motor yang digunakan untuk melakukan pekerjaan tertentu berbeda-beda sesuai dengan kebutuhannya (seperti motor sinkron dan induksi). Untuk mengubah tegangan dari AC ke DC (untuk motor sinkron) diperlukan sebuah konverter. Namun, pengoperasian konverter akan menimbulkan faktor daya. Faktor daya pada konverter terdiri dari dua komponen yaitu displacement and distortion (perpindahan dan distorsi). (ANSI/IEEE Std 519-1992)

Motor sinkron *cycloconverter-fed* GMD menyebabkan arus harmonik dalam jaringan dengan cara yang sama seperti dengan *converter-fed drive* DC. Karena konverter statis dari *cycloconverter* tiga fase juga beroperasi dalam mode mapan (*steady-state*) dengan sudut *firing* yang bervariasi secara terus menerus. Besarnya arus harmonik individu tergantung pada sudut firing *cycloconverter*, dan nilai yang berbeda diperoleh untuk operasi dalam modus sinusoidal dalam kisaran *start-up* dan dalam mode trapesium pada kecepatan tinggi.



Gambar 1 Modus Sinusoidal

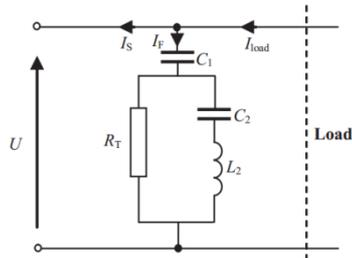


Gambar 2 Modus Trapesium

Semenjak pengaruh dari *cycloconverter*, ini menerima daya reaktif untuk kontrol dan pergantian dari sistem tenaga tiga fase. Dalam hubungan dengan faktor daya jaringan, perilakunya mirip dengan *converter-fed drive* DC. Ketika beralih dari posisi diam faktor daya sangat rendah. Nilai maksimal yang diperoleh dalam modus trapesium dengan mesin sinkron dikendalikan untuk aktual faktor daya mesin  $\cos \phi_2 = 1$ . Secara umum nilai-nilai ini berlaku di rating frekuensi dan tegangan dan karena itu juga di bidang kisaran melemahnya  $\cos \phi_1 = 0,72-0,84$ .

### **Harmonik Filter Orde-3 Tipe-C (HF)**

Kelebihan *high-pass* filter adalah dapat digunakan untuk menyaring harmonik orde tinggi dan mencakup berbagai frekuensi. Jenis khusus dari filter *high-pass* adalah filter Tipe-C, digunakan untuk menyediakan daya reaktif kapasitif dan menghindari resonansi paralel. Hal ini juga memungkinkan penyaringan harmonik orde rendah, sekaligus menjaga nol kerugian pada frekuensi *fundamental*.



Gambar 3 Harmonik Filter Tipe-C

Seri LC secara paralel dengan resistor disetel ke frekuensi daya. Resistor, oleh karena itu, dilewati oleh cabang nol impedansi dibentuk oleh elemen LC yang disesuaikan. Sehingga filter berperilaku sebagai kapasitor pada frekuensi fundamental. Pada frekuensi tinggi, induktor menjadi besar, dan arus akan mengalir melalui cabang resistif, menghasilkan kinerja yang mirip dengan filter orde pertama. (Alexandre B. Nassif, 2009)

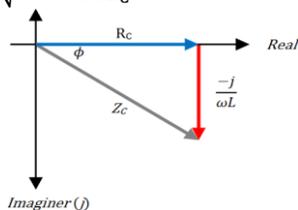
**Pengaruh Shutdown Periode Ke-I**

Efek transisi sistem yang terjadi akibat interval waktu *shutdown* SAG Mill dan mesin lainnya terhadap pemutusan HF yang memiliki rentang waktu 10 menit, mengakibatkan penurunan beban induktif yang cukup drastis, mengingat komponen dari GMD adalah induktif (motor SAG Mill, transformator eksitasi dan transformator *cycloconverter*).

Menurunnya reaktansi induktif, kemungkinan akan peningkatan reaktansi kapasitif karena perilaku filter sebagai kapasitor yang beroperasi pada frekuensi dasar. Apabila beban kapasitif mendominasi, maka arus akan mendahului tegangan (*leading power factor*). Kompensator kapasitor yang terhubung paralel pada saluran akan mencatu daya reaktif, sehingga kapasitor bank dapat mengubah watak beban yang bersifat induktif. (Wiwik Handajadi, 2014)

Arah vektor resultan dari  $Z_C$  yang berada pada kuadran ke-IV bernilai negatif, maka :

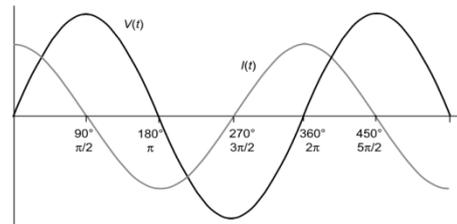
$$|Z_C| = \sqrt{R_C^2 + \frac{-1}{\omega C R_C}} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{-1}{\omega C R_C} \dots\dots (1)$$



Gambar 4 Impedansi Kompleks Untuk Rangkaian RC.

Dan karena itu, arus *fundamental* yang mengalir ke kapasitansi AC akan didefinisikan sebagai:

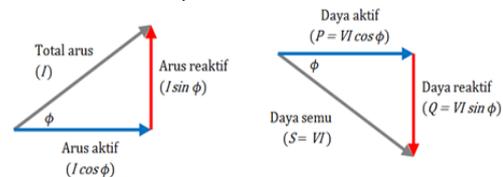
$$I_C(t) = I_{max} \sin(\omega t + 90^\circ) \dots\dots\dots (2)$$



Gambar 5 Arus Mendahului Tegangan Sebesar 90°

Sedangkan untuk menunjukkan bahwa arus aktif dan arus reaktif secara vektor untuk membentuk arus yang dihasilkan dapat ditentukan dari ekspresi berikut:

$$I = \sqrt{(I \cos \phi)^2 + (I \sin \phi)^2}$$



Gambar 6 Vektor arus total dan hubungan vektor daya aktif, reaktif, semu.

Sedangkan untuk menunjukkan bahwa arus aktif dan arus reaktif secara vektor untuk membentuk arus yang dihasilkan dapat ditentukan dari ekspresi berikut:

$$|S| = |VI| = \sqrt{(VI \cos \phi)^2 + (VI \sin \phi)^2} \dots\dots (3)$$

$$S = VI^* = P + jQ = VI (\cos \phi - j \sin \phi) \dots\dots (4)$$

**Pengaruh Periode Ke-II**

Periode dimana GMD dan mesin yang terkait, beserta HF sudah dalam keadaan stop untuk keperluan perawatan. Durasi perawatan SAG Mill berlangsung total selama 144 jam. Artinya, jika diasumsikan kedua unit tersebut (GMD dan HF) adalah penyerap daya yang sangat besar, maka bahan bakar (batu bara) yang berhubungan dengan investasi modal untuk membangkitkan daya (MVA), dapat dikurangi selama *shutdown*.

Transisi dari periode ke-I menuju ke-II menyebabkan pergeseran sudut fasa akibat suplai kapasitif HF tidak beroperasi. Perpindahan faktor daya (PF) adalah rasio dari daya aktif dari gelombang *fundamental* dengan daya semu. Ini adalah cosinus dari sudut fase dimana arus tertinggal atau mendahului tegangan. Rasio perpindahan ini adalah faktor daya. dengan asumsi bahwa tegangan AC adalah sinusoidal.

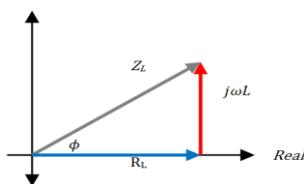
**Pengaruh Periode Ke-III**

Pengaturan interval waktu untuk HF beroperasi pasca *shutdown* adalah 10 menit setelah SAG Mill *start-up*. Untuk kembali ke kondisi operasi normal, sistem harus menunggu. Dalam interval waktu tersebut, sistem tidak mendapat kompensasi daya reaktif dan tidak mendapat peredam distorsi untuk beban-beban *nonlinear* dari HF.

Komponen HF tipe-C yang masih dalam keadaan *shutdown*, memaksa beban induktif mendominasi sistem selama interval waktu tersebut, yang mengakibatkan arus tertinggal terhadap tegangan. Perangkat induktif dari sistem GMD fungsinya didasarkan pada fakta fisika (hukum Biot-Savart) bahwa arus listrik menghasilkan medan magnet sekitarnya.

Efek dari sebuah induktor pada sirkuit arus bolak-balik diungkapkan oleh  $X_L$ . Sesuai dengan Gambar 9 bahwa arah resultan vektor  $Z_L$  (impedansi induktif) yang berada pada kuadran ke-I bernilai positif, maka :

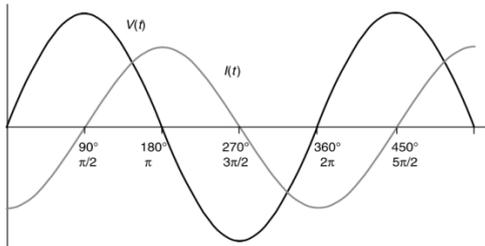
$$|Z_L| = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R_L} \dots \dots \dots (5)$$



Gambar 7 Impedansi kompleks untuk rangkaian RL.

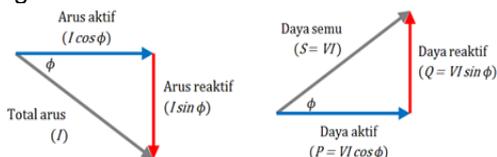
Maka tegangan induktansi AC akan didefinisikan sebagai :

$$V_L = \omega L I_{\max} \sin(\omega t + 90^\circ) \dots \dots \dots (6)$$



Gambar 8 Arus Tertinggal Terhadap Tegangan Sebesar 90°

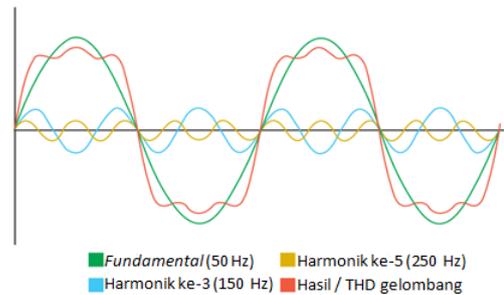
Hubungan fase kedua komponen antara arus satu sama lain, untuk arus total, dan tegangan yang menyebabkan perubahan resultan dan pergeseran arah vektor.



Gambar 9 Vektor Arus Total Hubungan Vektor Daya Aktif, Reaktif, Semu

Pasangan harmonis, seperti harmonik kelima dan ketujuh, memiliki potensi untuk menciptakan osilasi mekanik dalam kombinasi turbin-generator atau dalam sistem motor-beban. Osilasi mekanik terjadi ketika torsi berosilasi, yang disebabkan oleh interaksi antara arus harmonik dan medan magnet frekuensi dasar, membangkitkan frekuensi resonansi mekanik. Misalnya, harmonik kelima dan ketujuh dapat bergabung untuk menghasilkan stimulus torsi pada rotor generator yang pada frekuensi harmonik keenam. Jika resonansi frekuensi mekanik ada dekat dengan stimulus frekuensi listrik, kekuatan mekanik *high-stress* dapat terjadi.

Harmonik didefinisikan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang periodik atau kuantitas yang memiliki frekuensi yang merupakan kelipatan integral dari frekuensi dasar. Perhatikan bahwa, misalnya, komponen frekuensi dua kali lipat dari frekuensi dasar disebut harmonik kedua. (IEEE Std 159-1992)



Gambar 10 Distorsi Harmonik Frekuensi 50Hz.

Di mana komponen harmonik (h) adalah sinusoid yang memiliki frekuensi kelipatan atau orde ke-n dinyatakan dalam  $h = n \cdot 50 \text{ Hz}$ .

Setelah gelombang periodik telah dipecah menjadi komponen sinusoidal, sebuah analisis kuantitatif bagian-bagiannya dapat dibuat. Faktor distorsi istilah digunakan dalam analisis ini. IEEE Std 519-1992 mendefinisikan faktor distorsi (DF) dengan cara berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_2^\infty U_n}}{U_i} \times 100\% \dots \dots \dots (7)$$

$U_n$  = Komponen harmonik

$U_i$  = Komponen *fundamental*

Daftar batas arus harmonik berdasarkan pada ukuran beban berhubungan dengan ukuran sistem tenaga yang beban terhubung.  $I_{SC}/I_L$  adalah rasio sirkuit arus pendek tersedia pada *point of common coupling* (PCC), untuk arus fundamental beban maksimum.

Batas distorsi (IEEE 519-1992) untuk sistem 69 kV dan di bawahnya adalah 5% THD dan 3% IHD.

*Individual Harmonic Distortion* (IHD) hanya menghitung rasio komponen harmonik diberikan kepada komponen *fundamental*. Nilai ini kadang-kadang digunakan untuk melacak pengaruh masing-masing individu harmonik dan memeriksa besarnya.

Selain THD, efek harmonik yang diukur dalam bentuk aritmatik dari *fundamental* magnitude dan semua harmonik (ASUM), juga telephone influence factor (TIF) yang merupakan variasi dari THD dengan harmonik yang berbeda diberikan untuk dasar jumlah harmonik dari interferensi dari sebuah sinyal audio pada rentang frekuensi yang sama. Selain itu, indeks (IT) yang merupakan produk dari komponen arus (*fundamental* dan harmonik) juga dapat dihitung.

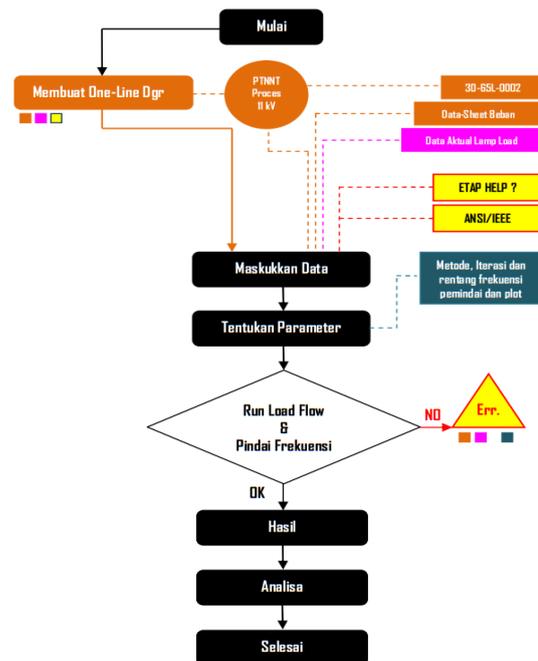
### METODE PENELITIAN

Pemodelan studi aliran harmonik menggunakan metode studi aliran beban harmonik, pertama melakukan perhitungan aliran daya pada frekuensi fundamental. Hasil dari aliran beban fundamental menetapkan dasar untuk tegangan bus fundamental dan arus cabang yang digunakan kemudian untuk menghitung indeks harmonik yang berbeda. Kemudian, untuk setiap frekuensi harmonik di mana setiap sumber harmonik ada dalam sistem, solusi aliran beban langsung ditemukan dengan menggunakan metode injeksi arus. Frekuensi harmonik dipertimbangkan adalah semua frekuensi order rendah. Impedansi komponen disesuaikan berdasarkan frekuensi harmonik dan jenis komponen.

Dalam penelitian ini, ETAP Versi 7.0.0. Studi aliran daya harmonik menggunakan metode iterasi Newton-Raphson dengan faktor ketelitian 0,0001 dengan maksimal 5 iterasi dan frekuensi scene dari 50 Hz hingga 15000 Hz (orde ke-30). Menggunakan standar ANSI Std 519, ANSI/IEEE Std 399 dan IEEE Std 141. Sedangkan untuk konstanta dan parameter lainnya menggunakan standar NEMA untuk mesin-mesin listrik.

Data penelitian diperoleh dari Process Electrical Maintenance Department, Process 130 & 106, Concentrator Area, PT. Newmont Nusa Tenggara (Gold Company), Batu Hijau, Kabupaten Sumbawa Barat, NTB. Adapun data tersebut adalah data operasional Concentrator Power Distribution 11 kV PTNNT.

Data tersebut termasuk data aktual operasi yang diambil secara langsung pada setiap MCC melalui metering pada setiap bus yang tersambung ke beban untuk dijadikan referensi dari data *lump-load*. Data aktual atau real time diambil saat operasi normal pada tanggal 21 Juli sampai 30 September 2015. Sedangkan data motor dan data beban lainnya diambil dari data-sheet dan buku operasi manual.



Gambar 11 Flow Chart Load Flow Harmonic

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada kondisi normal, *critical report* melaporkan adanya bus yang beroperasi dibawah tegangan nominal. Hal ini terjadi karena motor yang digunakan memiliki rating faktor 0,706 pada pembebanan 100%, 0,647 pada beban 75%, dan 0,335 saat beban 25%, (motor Rougher Scavenger). PF ini adalah penyebab utama menurunnya rating tegangan pada bus.

Tabel 1 *Critical Report*

Device ID	Tipe	Kondisi	Rating Batas	Unit	Operasi	(%) Operasi
34-TL-711	Transformer	Overload	0,420	MVA	0,576	137,1
34-TL-721	Transformer	Overload	0,420	MVA	0,571	135,9
35-SG-701	Bus	Under Voltage	0,575	kV	0,544	94,6
35-SG-702	Bus	Under Voltage	0,575	kV	0,544	94,6
35-SG-703	Bus	Under Voltage	0,575	kV	0,544	94,6
35-SG-704	Bus	Under Voltage	0,575	kV	0,544	94,6
35-SG-705	Bus	Under Voltage	0,575	kV	0,544	94,6

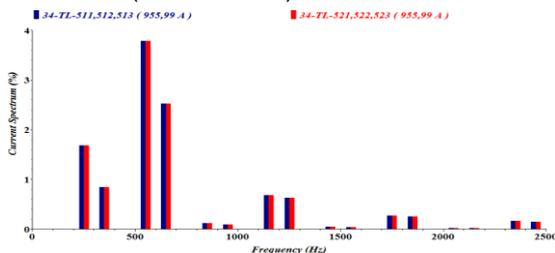
Sumber arus harmonik untuk kedua bus referensi (30-BD-301/3 dan 30-BD-302/312) tersebut adalah berasal dari VFD yang merupakan komponen nonlinear dan memiliki

model harmonik 12 pulsa. Arus harmonik dari VFD ini menyebabkan pergeseran sudut fase sebesar  $30^0$ . Pergeseran sudut fase juga disebabkan karena hubungan *delta-delta* dan *delta-wye* pada transformator. Model sumber harmonik 12 pulsa pada umumnya hanya berbahaya pada orde ke-11 dan orde ke-13.

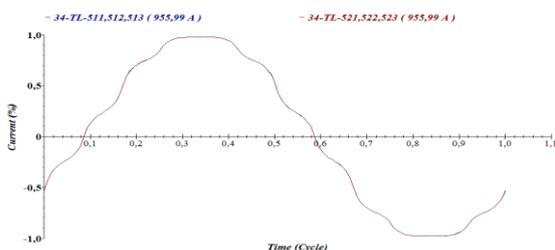
Tabel 2 Distorsi Harmonik VFD.

Orde	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Harmonik	15	17	19	23	25	29	31	35	37	41	43	47	49
Arus %	0	0	0	2.29	0	1.14	0	0	0	5.15	0	3.44	0

Aliran konten harmonik yang mengalir menuju transformator tergantung tergantung dari jenis beban yang dilayani oleh transformator tersebut. Contohnya pada taransformator *cycloconverter* yang melayani beban VFD dan SAG Mill, kemungkinan besar harmonik 12 pulsa akan mengalir dan harmonisa arus menyebabkan peningkatan kerugian tembaga dan kerugian fluks liar, dan harmonisa tegangan menyebabkan peningkatan kerugian besi. Efek keseluruhan adalah peningkatan pemanasan trafo, dibandingkan dengan operasi murni sinusoidal (fundamental).

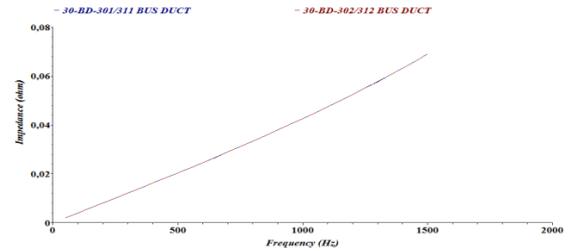


Gambar 12 Persentase Spektrum Arus Terhadap Orde Frekuensi Pada Transformator *Cycloconverter*.



Gambar 13 Karakteristik Persentase Arus Terhadap Domain Waktu Pada Transformator *Cycloconverter*.

Meningkatnya orde frekuensi pada sistem menyebabkan meningkatnya nilai impedansi pada sistem tersebut. Di mana hubungan keduanya di gamabarkan pada Gambar 14.

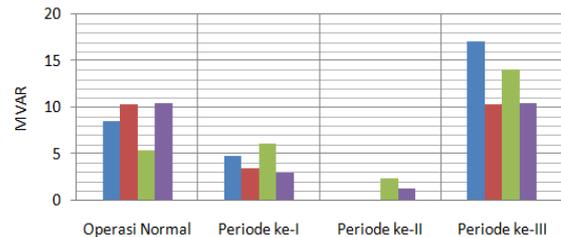


Gambar 14 Kurva Kenaikan Nilai Impedansi Terhadap Orde Frekuensi Pada Bus Referensi

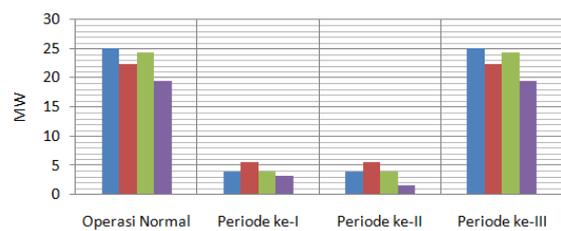
Total *electrical demand* (line 1 dan line 2) per periode adalah :

- Operasi normal = 97,895 MVA
- Periode ke-I = 17,384 MVA
- Periode ke-I = 20,975 MVA
- Periode ke-III = 105,214 MVA

Nilai MVA dipengaruhi oleh daya reaktif dan nyata. Untuk kebutuhan daya reaktif tertinggi terjadi pada periode ke-III. Dua cabang bus beban utama (30-SG-301 dan 30-SG-302) yang menunjukkan peningkatan yang paling banyak. Hal ini dikarenakan masing-masing kedua bus tersebut melayani GMD termasuk HF yang digunakan untuk mengkompensasi VAR dan harmonik.



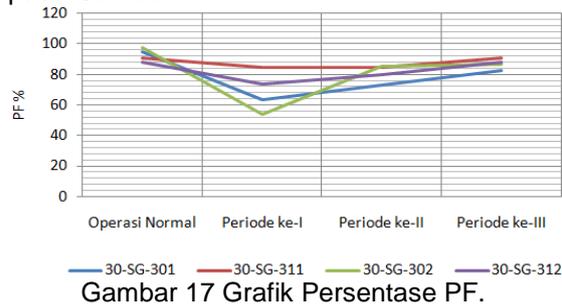
Gambar 15 Grafik Kebutuhan Q.



Gambar 16 Grafik Kebutuhan P.

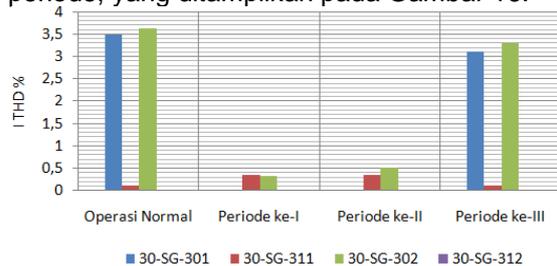
Fluktuasi kebutuhan daya nyata pada Gambar 16 menunjukkan penurunan dan kenaikan nilai yang teratur tergantung dari pengoperasian komponen. Berbeda dengan penomena fluktuasi daya Q bahwa kebutuhan daya reaktif pada tiap periode sangat tergantung pada persentase nilai faktor daya pada komponen yang beroperasi saat itu, yang dapat berubah sewaktu-waktu ketika dipengarungi filter. Nilai faktor daya secara

fluktuatif pada periode berbeda ditampilkan pada Gambar 17.



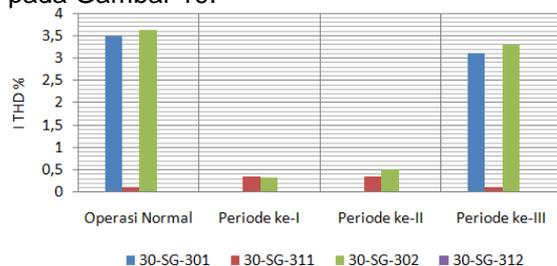
Gambar 17 Grafik Persentase PF.

Sedangkan penyesuaian estimasi aliran daya dalam sistem line 1 maupun line 2 terhadap empat cabang bus beban utama (30-SG-301, 30-SG-311, 30-SG-302, 30-SG-312) cukup merata. Penggunaan filter tipe-C sangat efektif untuk mereduksi kebutuhan MVA. Hal ini dapat dibuktikan secara matematis dengan membandingkan kebutuhan MVA pada periode operasi normal dengan periode ke-III, bahwa kebutuhan MVA paling tinggi terjadi pada periode ke-III ketika HF dalam keadaan shutdown. Hal ini dibuktikan pada total konsumsi S pada tiap periode, yang ditampilkan pada Gambar 16.



Gambar 18 Grafik Kebutuhan S.

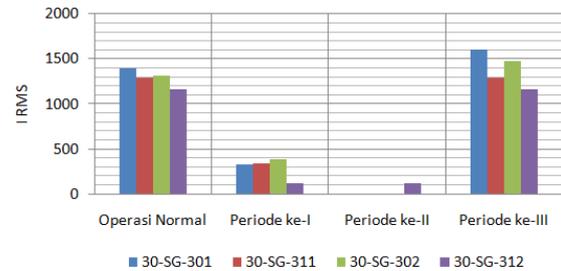
Arus harmonik akibat distorsi yang ditimbulkan oleh GMD yang membawa harmonik 12 pulsa tersebut tidak menunjukkan perubahan, baik ketika HF beroperasi atau tidak. Total arus harmonik (I THD) malah menurun ketika HF di matikan (pada periode ke-III). Hal ini dapat di lihat pada Gambar 19.



Gambar 19 Grafik Total Distorsi Arus

Tingginya nilai THD arus pada periode operasi normal daripada periode ke-III disebabkan HF tipe-C juga menyumbang harmonik sebesar 0,41%. Namun THD untuk keseluruhan sistem masih dapat dilorensi dan

nilainya tidak melewati standar yang ditetapkan ANSI/IEEE. Namun keuntungan dari pemasangan HF tipe-C dalam sistem distribusi adalah selain dapat mengurangi *electrical demand*, juga dapat mengurangi total arus RMS akibat dari konten harmonik. Berikut adalah grafik fluktuasi jumlah arus RMS pada tiap periode transisi yang ditampilkan pada Gambar 20.



Gambar 20 Grafik Nilai IRMS

## KESIMPULAN DAN SARAN

- Pada kondisi operasi normal, total daya terpakai adalah sebesar 97,895 MVA: pada power grid line 1 (XFMR 30-TL-301) adalah 51,126 MVA dengan faktor daya 92,91% lagging dan line 2 (XFMR 30-TL-302). 46,54 MVA dengan faktor daya 94,05% lagging. Dengan THD arus tertinggi mencapai 3,51% pada bus 30-SG-301 dan 3,65% pada bus 30-SG-302.
- Interval waktu pemutusan daya SAG Mill terhadap HF pada periode ke-I mengakibatkan penurunan nilai reaktansi induktif yang bersumber dari SAG Mill dan mesin induksi lainnya, sehingga reaktansi kapasitif yang berasal dari komponen C dari HF Orde-3 Tipe-C yang masih beroperasi, mendominasi jaringan yang menjadikan faktor daya dalam jaringan menjadi leading (sebesar 98,96% untuk line 1 dan 91,64% untuk line 2) dan rugi-rugi daya menjadi berkurang. Dengan THD arus tertinggi mencapai 0,34% pada bus 30-SG-311 dan 0,31% pada bus 30-SG-302 dan THD arus pada bus lainnya menghilang.
- Memasuki periode ke-II, ketika SAG Mill dan HF telah stop, electric demand menjadi berkurang secara signifikan sebesar 78,57% dari total operasi normal (97,895 MVA menjadi 20,975 MVA). Namun saat itu juga THD arus pada bus 30-SG-302 meningkat menjadi 0,5% sedangkan untuk bus 30-SG-311 tetap 0,34% dan THD arus pada bus lainnya menghilang.

- d) Interval waktu start-up SAG Mill terhadap HF pasca *shutdown* pada periode ke-III mengakibatkan peningkatan kebutuhan MVA (*electrical demand*) sebesar 6,95% dari kondisi operasi normal (dari 97,895 MVA menjadi 105,214 MVA) akibat VAR yang tidak terkompensasi. Selain itu, peningkatan arus RMS pada periode ini meningkat, sama halnya dengan THD arus pada bus 30-SG-301 kembali muncul sebesar 3,12% sedangkan untuk bus 30-SG-302 menjadi 3,31% dan sisanya berkurang.
- e) *Electrical demand* tertinggi terjadi pada periode ke-III. Sementara harmonik model 12 pulsa yang berasal dari VFD, SAG Mill dan *Cycloconverter* hanya mendistorsi arus dan menyebabkan meningkatnya arus RMS, dan pengaruhnya terhadap tegangan sangat kecil dan tidak terlalu berarti.
- f) Untuk mendapatkan profil yang lebih baik dari perilaku sistem daya dan informasi yang diberikan oleh pemodelan aliran listrik secara aktual, hendaknya membuat perubahan kecil untuk kondisi bus yang beroperasi dan bagaimana cara mereka merespon saat terjadi periode transisi *shutdown* ketika *maintenance* berlangsung.
- g) Dinamika yang terjadi dalam sistem daya ketika periode transisi *shutdown* berlangsung dapat dijadikan bahan evaluasi untuk menyesuaikan efisiensi, kebutuhan dan estimasi aliran daya.
- h) Adanya penelitian lebih lanjut mengenai pengaturan interval waktu *shutdown* dan studi filter placement yang berhubungan dengan efektifitas dan efisiensi aliran daya ketika *shutdown* akan sangat berguna.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Andersson, G. (2004) *Modelling and Analysis of Electric Power Systems: Power Flow Analysis Fault Analysis Power Systems Dynamics and Stability*. EEH - Power Systems Laboratory ETH Zürich, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich.
- ANSI (1993) *IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Revision of IEEE SM 519-1981*. ISBN 1-55937-239-7, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, A.S.
- Handajadi, W. (2014) Analisis Perbaikan Tegangan Pada Subsistem Dengan Pemasangan Kapasitor Bank Dengan ETAP Versi 7.0. Jurusan Teknik Elektro, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta.
- Handajadi, W. (2014) Peningkatan Kualitas Daya Listrik Dalam Pemakaian Lumener Menggunakan Lampu Hemat Energi (LHE), Jurusan Teknik Elektro, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta.
- IEEE (1993) *IEEE Std 141-1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. ISBN 1-55937-333-4, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York.
- IEEE (2003) *IEEE Std 15316-2003: IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters*. ISBN 0-7381-3719-7 SS95143, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York.
- Kalempka, R. (2012) *A New Method for the C-Type Passive Filter Design*, *Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 7a.
- Klempka R., Hanzelka, Z. & Varetsky Y. (2013) *Bank Harmonic Filters Operation in Power Supply System – Cases Studies, Power Quality Issues, Chapter 8*, INTCH.
- Mehrotra, V. (2011) *Comparison of Standards – ANSI/IEEE and IEC, C57.12.00-2010 with IEC 60076-1 (2000)*. *Standards Subcommittee, IEEE Transformers Committee*.
- Meier, Alexandra von (2006) *Electrical Power Systems: A Conceptual Introduction*, ISBN-13: 978-0-471-17859-0, ISBN-10: 0-471-17859-4, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Mismail, B., Stevenson W.D. Jr. (1982) Analisis Sistem Tenaga, Lembaga Penerbitan Universitas Brawijawa, Malang.
- Nassif, Alexandre B. (2012) *An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 24, No.3*.
- Saftiawan, A. (2016) Efek Transisi Shutdown Semi-Autogenous Mill Dan 3<sup>rd</sup> C-Type

Harmonic Filter Terhadap Efisiensi Distribusi Jaringan Listrik ; Studi Kasus : Concentrator Power Distribution 11 kV PTNNT. Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta, Yogyakarta.

\_\_\_\_\_ (2005) *Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption*, Federal Energy Regulatory Commission. Washington, D.C.

\_\_\_\_\_ (2005) *Validation Cases and Comparison Results*, ETAP, Operation Technology, Inc.

\_\_\_\_\_ (2008) *SAG Mill Drive Operation Manual*, ABB Switzerland Ltd.

\_\_\_\_\_ *Gearless mill drives : Go gearless*, ABB Switzerland Ltd.

\_\_\_\_\_ PT. Newmont Nusa Tenggara.