

Studi Gangguan Hubung Tanah Stator Generator Menggunakan Metoda Harmonik Ketiga di PT. Indonesia Power UP. Saguling

WALUYO¹, GARY ANDRI SEPGIANTO¹, SITI SAODAH²

1. Jurusan Teknik Elektro – Institut Teknologi Nasional Bandung
 2. Jurusan Teknik Elektro – Politeknik Negeri Bandung
- Email : garyandri.sepgianto@gmail.com

ABSTRAK

Generator sinkron merupakan peralatan yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Keandalan fungsi generator sangat penting, sehingga perlu diproteksi untuk mencegah terjadinya kerusakan dari gangguan yang tidak diinginkan yaitu hubung singkat satu fasa ke tanah. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh besar perubahan tegangan harmonik ketiga saat terjadi gangguan hubung tanah stator. Untuk menentukan karakteristik harmonik ketiga, maka perhitungan dilakukan pada dua kondisi yaitu kondisi normal dan gangguan. Metode harmonik ketiga pada kondisi gangguan menggunakan tiga skema. Saat skema tegangan kurang besaran tegangan harmonik ketiga adalah sebesar 35-40 Volt. Saat skema tegangan lebih maka besaran tegangan harmonik ketiga adalah sebesar 130-135 Volt. Saat skema rasio tegangan, rasio V_{3t} terhadap V_{3nr} maka saat kondisi normal adalah 0,81, dimana daerah yang terlindungi pada skema ini sebesar 60% dari netral generator.

Kata kunci : generator, gangguan hubung tanah stator, harmonik ketiga, skema harmonik ketiga

ABSTRACT

Synchronous generator is a device that converts mechanical energy into electrical energy. Reliability function generator is very important, so that a protection to prevent damage from unwanted interference, ie one phase short circuit to ground, is necessary. The purpose of study was to obtain third harmonic voltage magnitude changes during disturbances of stator ground fault. To determine third harmonic characteristic, a computation was performed on two conditions, namely normal and fault conditions. The third harmonic method, under fault conditions, used three schemes. When it was under voltage scheme, the third harmonic voltages were 35-40 Volts. When it was the third harmonic over voltage scheme, the magnitudes were 130-135 Volts. When the voltage ratio scheme, the ratio of the current V_{3t} to V_{3nr} , so that the normal condition was 0.81, where the protected area in this scheme was 60% of the generator neutral.

Keywords: generator, stator ground fault, the third harmonik, the third harmonik scheme

1. PENDAHULUAN

Generator sinkron merupakan peralatan listrik yang sangat penting bagi sistem tenaga listrik, dikarenakan generator menghasilkan pasokan daya yang nantinya akan digunakan oleh konsumen. Keandalan dan fungsi dari generator sangat penting, maka dari itu generator perlu diproteksi dengan baik agar mencegah terjadinya kerusakan pada generator.

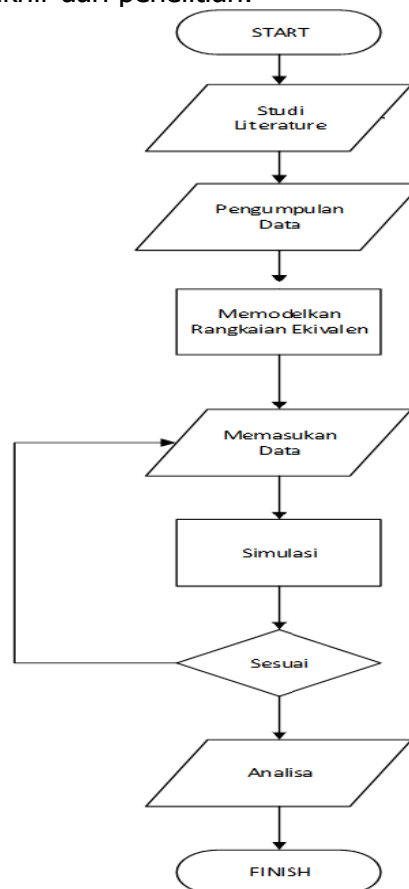
Salah satu gangguan yang terjadi pada generator terutama pada belitan stator adalah hubung singkat stator. Penyebab dari kerusakan generator yaitu penurunan kekuatan isolasi dan tegangan lebih akibat petir atau surja hubung.

Di PT UP. Saguling proteksi yang digunakan hanya metode proteksi konvensional, dimana metode proteksi konvensional ini hanya melindungi 95% dari titik terminal, sedangkan 5% sisanya yang berada dekat netral tidak terlindungi dari gangguan hubung tanah stator. Maka dari itu dengan menggunakan harmonik ketiga ini, belitan stator dapat terlindungi 100% dari gangguan hubung tanah stator generator (Gilany, 2002). Tujuan penelitian ini adalah memperoleh besar harmonik ketiga bilamana terjadi gangguan satu fasa ke tanah.

2. METODOLOGI PERANCANGAN

2.1 Flowchart

Gambar 1 di bawah merupakan *Flowchart* yang menggambarkan langkah-langkah penelitian dari awal sampai akhir dari penelitian.



Gambar 1. Flowchart langkah-langkah penelitian

2.2 Data Generator

Tabel 1 di bawah merupakan data generator unit 4 di PT. Indonesia Power UP. Saguling yang dijadikan objek untuk pengambilan data.

Tabel 1. Data generator unit 4 PLTA PT. Indonesia Power UP. Saguling

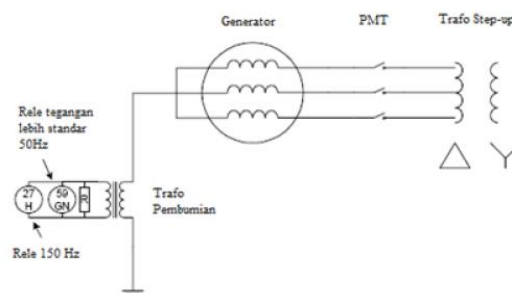
<i>Manufacture name</i>	MELCO
<i>Rated Output</i>	206.100 kVA
<i>Rated Voltage</i>	16,5 kV
<i>Rated Current</i>	7.212 A
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Rated power factor</i>	0,85
<i>Synchronus speed</i>	333 rpm
<i>Synchronous reactance (X_d)</i>	0,93 p,u
<i>Transient Reactance (X_d')</i>	0,199 p,u
<i>Reaktansi Subtransient (X_d'')</i>	0,128 p,u
<i>Reaktansi urutan negative (X_2)</i>	0,134 p,u
<i>Reaktansi urutan nol (X_0)</i>	0,105 p,u
<i>Ground Resistansi</i>	953 ohm
<i>Capacitance stator</i>	0,495 μ F
<i>Capacitance bus</i>	0,0206 μ F
<i>Capacitance Surge</i>	0,13 μ F
<i>Capacitance Transformator</i>	0,15 μ F

2.3 Proteksi Tegangan Harmonik Ketiga

Sistem proteksi menggunakan metode tegangan harmonik ketiga dapat dilakukan dengan tiga cara yang berbeda.

2.3.1 Skema Tegangan Kurang

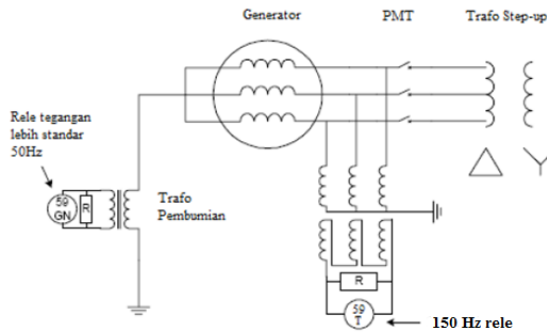
Pada Gambar 2 di bawah merupakan skema proteksi tegangan kurang dimana skema ini mengukur tegangan harmonik ketiga yang terdapat pada tegangan netral generator. Terdapat 2 rele yang terdapat pada sisi netral generator yaitu rele 59GN dan rele 27H sebagai rele *undervoltage* dimana frekuensinya adalah 150 Hz (Klingerman, 2015).



Gambar 2. Skema proteksi tegangan kurang

2.3.2 Skema Tegangan Lebih

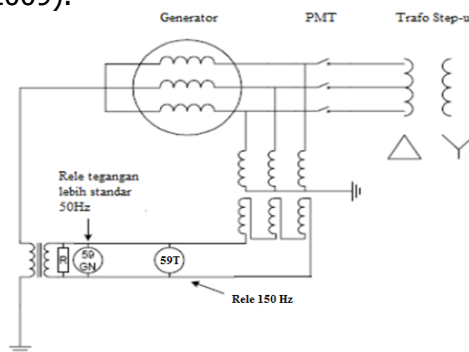
Gambar 3 di bawah ini merupakan skema proteksi tegangan lebih dimana skema ini mengukur tegangan harmonik ketiga pada terminal generator. Terdapat 2 rele pada skema ini yaitu rele 59 GN yang terletak di sisi netral, dan rele 59T dimana frekuensinya adalah 150 Hz yang terletak di sisi terminal (Klingerman, 2015).



Gambar 3. Skema proteksi tegangan lebih

2.3.3 Skema Rasio Tegangan

Gambar 4 di bawah ini merupakan skema proteksi rasio tegangan dimana pada skema ini tegangan harmonik ketiga diukur pada kedua ujung belitan, yaitu pada netral dan terminal generator. Terdapat 2 rele pada skema ini yaitu rele 59GN dan rele 59T yang bekerja pada frekuensi 150 Hz. Kedua tegangan ini akan dibandingkan dan didapatkan rasio perbandingannya (Mahendra, 2009).



Gambar 4. Skema proteksi rasio tegangan

2.4 Tegangan Harmonik Ketiga pada Generator

Tegangan harmonik ketiga pada kondisi beban ringan merupakan tegangan minimum sedangkan tegangan harmonik ketiga pada kondisi beban penuh merupakan tegangan maksimum. Tegangan harmonik ketiga saat beban ringan sebesar 57% dari tegangan harmonik beban nol, dan tegangan harmonik ketiga pada beban penuh adalah 200% dari tegangan harmonik beban nol (Schalke, 1981).

2.4.1 Tegangan Harmonik ketiga saat beban nol.

Tegangan harmonik ketiga yang diperoleh saat kondisi tanpa beban

$$E_{3 \text{ no load}} = 1,3 \% \times V_{L-N} \dots \dots \dots (1)$$

2.4.2 Tegangan Harmonik ketiga saat beban ringan

Tegangan harmonik ketiga saat kondisi tegangan minimum

$$E_{3 \text{ light load}} = 57 \% \times E_{3 \text{ no load}} \dots \dots \dots (2)$$

2.4.3 Tegangan Harmonik ketiga saat beban penuh

Tegangan harmonik ketiga saat kondisi tegangan maksimum

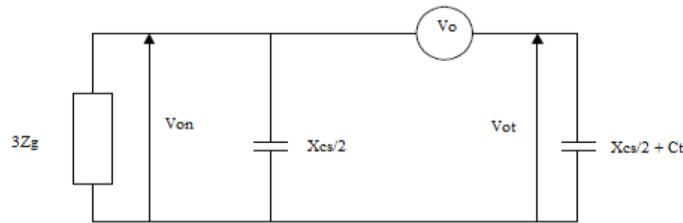
$$E_{3 \text{ full load}} = 200 \% \times E_{3 \text{ no load}} \dots \dots \dots (3)$$

2.5 Rangkaian Ekuivalen

Rangkaian ekuivalen untuk simulasi karakteristik tegangan harmonik ketiga dapat dibagi menjadi dua. Pertama, kondisi normal dan yang kedua adalah saat kondisi gangguan.

2.5.1 Rangkaian Ekuivalen Kondisi Normal

Pada Gambar 5 di bawah ini diperlihatkan rangkaian ekuivalen kondisi normal dimana terdapat tegangan harmonik ketiga, tahanan pembumian generator, kapasitansi stator dan kapasitansi yang berasal dari luar generator generator (Julian, 2006).



Gambar 5. Rangkaian ekuivalen kondisi normal

2.5.1.1 Kapasitansi, reaktansi dan impedansi pada kondisi normal

Kapasitansi, reaktansi dan impedansi yang didapatkan pada rangkaian urutan nol

- a. Kapasitansi sisi netral

$$C_{on} = \frac{1}{2} \times C_{generator} \dots\dots\dots (4)$$

- b. Kapasitansi sisi terminal

$$C_{ot} = \left(\frac{1}{2} \times C_{generator}\right) + C_{bus} + C_{trafo} + C_{cb} \dots\dots\dots (5)$$

- c. Reaktansi sisi netral

$$X_{on} = -j \frac{1}{2\pi \times f \times 3 \times C_{on}} \dots\dots\dots (6)$$

- d. Reaktansi sisi terminal

$$X_{ot} = -j \frac{1}{2\pi \times f \times 3 \times C_{ot}} \dots\dots\dots (7)$$

- e. Impedansi sisi netral

Impedansi sisi netral adalah gabungan paralel dari X_{on} dan $3R_n$ yaitu sebesar

$$Z = \frac{-jX_{on} \times 3R_n}{3R_n - jX_{on}} \dots\dots\dots (8)$$

2.5.1.2 Tegangan Harmonik saat kondisi beban nol, beban ringan dan beban penuh

Terdapat dua tegangan harmonik ketiga saat kondisi beban nol, beban ringan, dan beban penuh, yaitu :

- a. Tegangan pada sisi netral generator

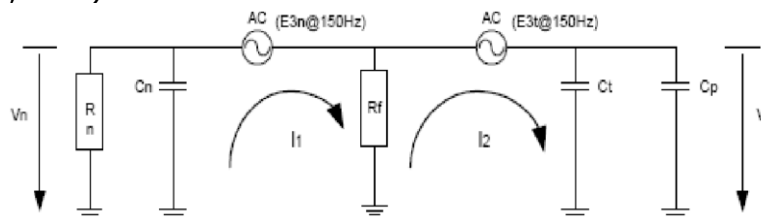
$$V_{on} = V_o \times \frac{Z_{on}}{Z_{on} - jX_{ot}} \dots\dots\dots (9)$$

- b. Tegangan pada sisi terminal generator

$$V_{ot} = V_o \times \frac{jX_{ot}}{Z_{on} - jX_{ot}} \dots\dots\dots (10)$$

2.5.2 Rangkaian Ekuivalen Kondisi gangguan

Gambar 6 di bawah ini merupakan rangkaian ekuivalen generator saat gangguan dimana terdapat tegangan harmonik ketiga di sisi netral dan di sisi terminal, tahanan pentanahan, tahanan gangguan, kapasitansi stator sisi netral dan sisi terminal, dan kapasitansi luar generator (Julian, 2006).



Gambar 6. Rangkaian ekuivalen fasa yang terganggu

2.5.2.1 Tegangan Harmonik Ketiga Belitan Stator

Tegangan harmonik ketiga yang dibangkitkan sepanjang belitan stator dari titik netral hingga terminal berupa :

- a. Tegangan harmonik ketiga di netral
Tegangan harmonik ketiga yang dihasilkan belitan stator antara netral generator dan titik gangguan K
 $E_{3n} = K \times E_3$ (11)
- b. Tegangan harmonik ketiga di terminal
Tegangan harmonik ketiga yang dihasilkan belitan stator antara netral titik gangguan K dengan terminal generator
 $E_{3t} = (1-K) \times E_3$ (12)

2.5.2.2 Kapasitansi

Terdapat dua kapasitansi belitan stator ke tanah, yaitu kapasitansi belitan stator ke tanah di netral dan kapasitansi belitan stator ke tanah di terminal

- a. Kapasitansi belitan stator ke tanah di netral
Kapasitansi belitan stator ke tanah antara titik netral generator dengan titik gangguan K
 $C_n = K \times C_{stator}$ (13)
- b. Kapasitansi belitan stator ke tanah di terminal
Kapasitansi belitan stator ke tanah antara titik terminal generator dengan titik gangguan K
 $C_t = (1-K) \times C_{stator}$ (14)

2.6 Rasio Tegangan

Pada metode ini, tegangan harmonik ketiga di netral dan terminal generator diukur. Kedua tegangan ini kemudian dibandingkan untuk mendapatkan rasio tegangan.

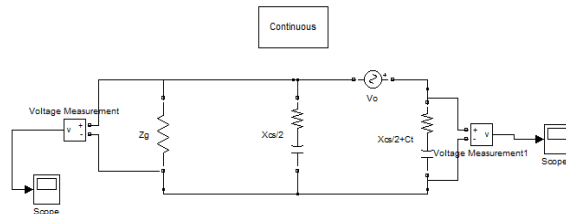
$$\text{Rasio} = \frac{[V_{3t}]}{[V_{3n}]} \dots\dots\dots (15)$$

2.7 Simulasi menggunakan Matlab-Simulink

Simulasi dilakukan pada dua keadaan, yaitu keadaan normal dan keadaan gangguan. Letak titik gangguan disimulasikan sebagai fungsi jarak dari titik netral. Jarak ini adalah 0%, 10%, 20%, 30%, ..., 100% dari netral generator. Tahanan gangguan divariasikan sebesar 5Ω, 50Ω, 500Ω, 700Ω, 5 kΩ, 50 kΩ, 500 kΩ.

2.7.1 Simulasi Pada Keadaan Normal

Gambar 7 di bawah ini merupakan rangkaian simulasi pada keadaan normal dilakukan untuk mendapatkan distribusi tegangan harmonik ketiga pada terminal dan titik netral generator.



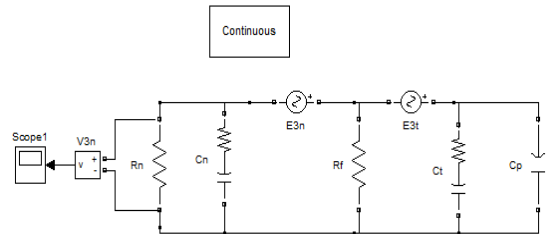
Gambar 7. Rangkaian simulasi pada keadaan normal

2.7.2 Simulasi Pada Keadaan gangguan

Simulasi dilakukan dengan tiga buah skema yaitu skema tegangan kurang, skema tegangan lebih, dan skema rasio tegangan. Ketiga skema ini dilakukan pada tiga pembebanan yaitu beban nol, beban ringan, dan beban penuh. Rangkaian simulasi ini dibuat dari Gambar 6 yaitu rangkaian ekivalen kondisi gangguan.

1. Skema tegangan kurang

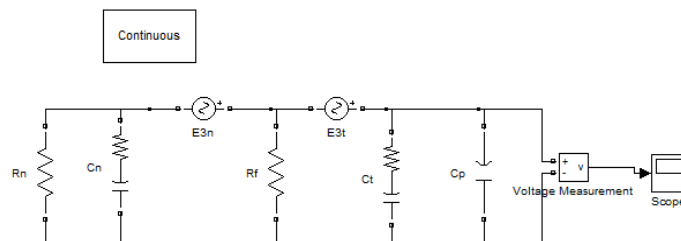
Gambar 8 di bawah ini merupakan rangkaian simulasi skema tegangan kurang, dimana tegangan harmonik ketiga yang diukur pada titik netral generator. E_{3n} dan E_{3t} diperoleh dari belitan stator antara netral gangguan generator dan titik gangguan K, dan diantara titik gangguan dan terminal generator.



Gambar 8. Rangkaian simulasi skema tegangan kurang

2. Skema tegangan lebih

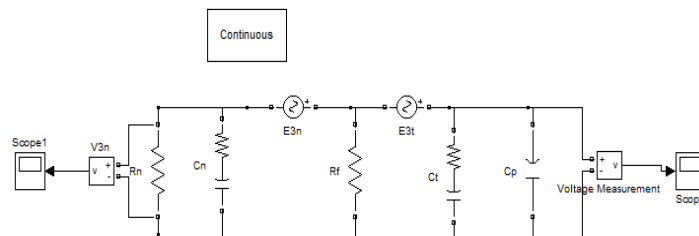
Gambar 9 di bawah ini merupakan skema tegangan lebih tegangan harmonik ketiga yang diukur pada titik terminal generator.



Gambar 9. Rangkaian simulasi skema tegangan lebih

3. Skema rasio tegangan

Gambar 10 di bawah ini merupakan skema tegangan harmonik ketiga dimana kedua sisi yang berada di netral dan terminal generator diukur.



Gambar 10. Rangkaian Simulasi skema rasio tegangan

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Tegangan Harmonik ketiga

Tegangan harmonik ketiga saat beban ringan sebesar 57% dari tegangan harmonik beban nol, dan tegangan harmonik ketiga pada beban penuh adalah 200% dari tegangan harmonik beban nol (Schlake, 1981).

- a. Tegangan harmonik ketiga saat beban nol

$$\begin{aligned} E_{3 \text{ no load}} &= 1,3 \% \times V_{L-N} \\ &= 1,3 \% \times 16500 \\ &= 123,84 \text{ Volt} \end{aligned}$$

- b. Tegangan Harmonik ketiga saat beban ringan

$$E_{3 \text{ light load}} = 57 \% \times E_{3 \text{ no load}}$$

$$= 57 \% \times 123,84$$

$$= 70,59 \text{ Volt}$$

- c. Tegangan Harmonik ketiga saat beban penuh

$$E_{3 \text{ full load}} = 200 \% \times E_{3 \text{ no load}}$$

$$= 200 \% \times 123,84$$

$$= 247,68 \text{ Volt}$$

Tabel 2. Tegangan harmonik ketiga pada kondisi berbagai keadaan

Kondisi Pembebanan	Tegangan Harmonik Ketiga
Beban nol	123,84 V
Beban ringan	70,59 V
Beban penuh	247,68 V

Tabel 2 di atas merupakan tegangan harmonik ketiga saat kondisi normal dari tiga pembebanan yaitu beban nol, beban ringan dan beban penuh.

3.2 Distribusi Tegangan Harmonik Ketiga pada Kondisi Normal

Kapasitansi sisi netral (C_{on}) adalah setengah dari kapasitansi belitan stator (C_{stator}), dan kapasitansi terminal (C_{ot}) sebesar setengah kapasitansi belitan stator ditambah dengan kapasitansi eksternal ($C_{bus} + C_{trafo} + C_{cb}$)

Nilai C_{on} dan C_{ot} dapat dihitung dari konstanta generator sebagai berikut.

- a. Kapasitansi sisi netral.

$$C_{on} = \frac{1}{2} \times C_{stator}$$

$$= \frac{1}{2} \times 0,495 \mu\text{F}$$

$$= 0,2475 \mu\text{F}$$

- b. Kapasitansi sisi terminal.

$$C_{ot} = \left(\frac{1}{2} \times C_{stator}\right) + C_{bus} + C_{trafo} + C_{cb}$$

$$= \left(\frac{1}{2} \times C_{stator}\right) + 0,0206 \mu\text{F} + 0,15 \mu\text{F} + 0,13 \mu\text{F}$$

$$= 0,5481 \mu\text{F}$$

- c. Reaktansi kapasitif sisi netral

$$X_{on} = -j \frac{1}{2\pi \times f \times 3 \times C_{on}}$$

$$= -j \frac{1}{2\pi \times 150 \times 0,2475 \mu}$$

$$= -j 4289,17 \Omega$$

- d. Reaktansi kapasitif sisi terminal

$$X_{ot} = -j \frac{1}{2\pi \times f \times 3 \times C_{ot}}$$

$$= -j \frac{1}{2\pi \times 150 \times 0,5481 \mu}$$

$$= -j 1936,82 \Omega$$

Dimana f_3 adalah frekuensi ketiga yaitu sebesar 150 Hz.

- e. Impedansi sisi netral adalah gabungan paralel dari X_{on} dan $3R_n$ sebesar:

$$Z = \frac{X_{on} \times 3R_n}{3R_n + X_{on}}$$

$$= \frac{-j4289,17 \times (3 \times 953)}{(3 \times 953) - j4289,17}$$

$$= 1979,49 - j 1319,46 \Omega$$

3.2.1 Distribusi Tegangan Harmonik Ketiga saat Kondisi Tidak Berbeban.

Berikut distribusi tegangan harmonik pada sisi netral dan terminal generator beban nol.

a. Tegangan pada sisi netral generator.

$$\begin{aligned} V_{on} &= V_o \times \frac{Z_{on}}{Z_{on}+X_{ot}} \\ &= 123,84 \times \frac{1979,49 - j 1319,46}{(1979,49 - j 1319,46) - j 1936,82} \\ &= 69,97 + j32,69 \\ &= 77,1 \angle 25,04^0 \text{ volt} \end{aligned}$$

b. Tegangan pada sisi terminal generator.

$$\begin{aligned} V_{ot} &= V_o \times \frac{X_{ot}}{Z_{on}+X_{ot}} \\ &= 123,84 \times \frac{-j 1936,82}{(1979,49 - j 1319,46) - j 1936,82} \\ &= -32,69 - j53,7 \\ &= 62,9 \angle -121,31^0 \text{ volt} \end{aligned}$$

3.2.2 Distribusi Tegangan Harmonik Ketiga saat Kondisi Generator Berbeban Ringan

Berikut distribusi tegangan harmonik pada sisi netral dan terminal generator beban ringan.

a. Tegangan pada sisi netral generator

$$\begin{aligned} V_{on} &= V_o \times \frac{Z_{on}}{Z_{on}+X_{ot}} \\ &= 70,59 \times \frac{1979,49 - j 1319,46}{(1979,49 - j 1319,46) - j 1936,82} \\ &= 39,93 + j18,64 \\ &= 44,07 \angle 25^0 \text{ volt} \end{aligned}$$

b. Tegangan pada sisi terminal generator

$$\begin{aligned} V_{ot} &= V_o \times \frac{X_{ot}}{Z_{on}+X_{ot}} \\ &= 70,59 \times \frac{-j 1936,82}{(1979,49 - j 1319,46) - j 1936,82} \\ &= -18,63 - j30,65 \\ &= 35,87 \angle -121,29 \text{ volt} \end{aligned}$$

3.2.3 Distribusi Tegangan Harmonik Ketiga Saat Kondisi Generator Berbeban Penuh

Berikut distribusi tegangan harmonik pada sisi netral dan terminal generator beban penuh.

a. Tegangan pada sisi netral generator.

$$\begin{aligned} V_{on} &= V_o \times \frac{Z_{on}}{Z_{on}+X_{ot}} \\ &= 247,68 \times \frac{1979,49 - j 1319,46}{(1979,49 - j 1319,46) - j 1936,82} \\ &= 139,94 + j65,39 \\ &= 154,461 \angle 25,04^0 \text{ volt} \end{aligned}$$

b. Tegangan pada sisi terminal generator.

$$\begin{aligned} V_{ot} &= V_o \times \frac{X_{ot}}{Z_{on}+X_{ot}} \\ &= 247,68 \times \frac{-j 1936,82}{(1979,49 - j 1319,46) - j 1936,82} \\ &= -65,387 - j107,49 \\ &= 125,81 \angle -121,3^0 \text{ volt} \end{aligned}$$

Tabel 3. Distribusi Tegangan Harmonik Ketiga

	Vo (volt)	Von (Volt)	Vot (volt)
Beban nol	123.84	77.1 \angle 25.04°	62.9 \angle -121.31°
beban ringan	70.59	44.07 \angle 25°	35.87 \angle -121.29°
beban penuh	247.68	154.461 \angle 25,04°	125.81 \angle -121.3°

Tabel 3 di atas merupakan distribusi tegangan harmonik ketiga sepanjang belitan stator saat kondisi normal dari tiga pembebanan, yaitu beban nol, beban ringan dan beban penuh secara perhitungan.

3.3 Simulasi Menggunakan MATLAB-Simulink

Terdapat dua simulasi yang akan digunakan yaitu simulasi saat keadaan normal dan simulasi saat keadaan gangguan.

3.3.1 Simulasi Pada Keadaan Normal

Simulasi pada keadaan normal dilakukan untuk mendapatkan distribusi tegangan harmonik ketiga pada titik netral dan terminal generator. Rangkaian simulasi kondisi normal pada MATLAB bisa dilihat pada Gambar 7. Berikut hasil distribusi tegangan harmonik ketiga pada sisi netral generator dan sisi terminal generator.

Tabel 4. Hasil Simulasi kondisi normal

	Vo (volt)	Von (Volt)	Vot (volt)
Tidak berbeban	123.84	77.1 \angle 25.04°	62.9 \angle -121.31°
beban ringan	70.59	44.07 \angle 25°	35.87 \angle -121.29°
beban penuh	247.68	154.461 \angle 25,04°	125.81 \angle - 121.3°

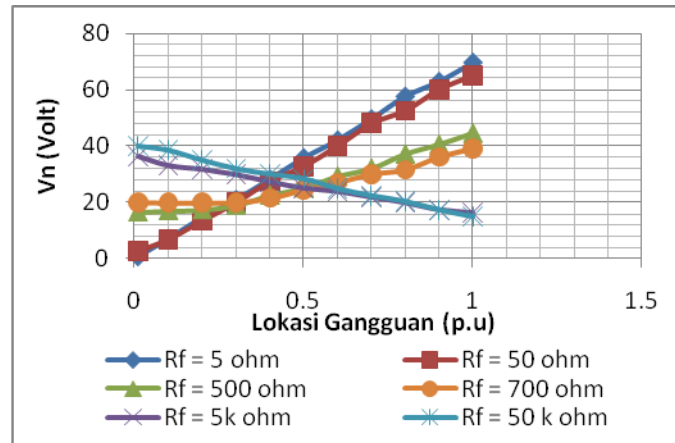
Tabel 4 di atas merupakan hasil simulasi distribusi tegangan harmonik ketiga sepanjang belitan stator saat kondisi normal dari tiga pembebanan yaitu beban nol, beban ringan dan beban penuh menggunakan MATLAB-Simulink.

3.3.2 Simulasi pada Keadaan gangguan

Simulasi dilakukan dengan tiga buah skema yaitu skema tegangan kurang, skema tegangan lebih, dan skema rasio tegangan. Simulasi dilakukan dengan tiga pembebanan yaitu beban nol, beban ringan dan beban penuh dengan mengubah-ubah jarak gangguan 0% - 100% dari netral dan tahanan gangguan (R_f). Tahanan gangguan yang dipakai adalah 5 Ω , 50 Ω , 500 Ω , 700 Ω , 5k Ω , dan 50 k Ω .

3.3.2.1 Skema tegangan kurang

Skema ini bisa dilihat pada Gambar 8 dimana tegangan harmonik ketiga diukur dan dilihat pada sisi netral generator. Skema ini didasarkan pada keadaan bahwa tegangan harmonik ketiga pada titik netral generator mengalami penurunan ketika gangguan terjadi di titik netral tersebut, sehingga situasi terburuk terjadi ketika generator menghasilkan tegangan harmonik ketiga minimum yang artinya pada kondisi beban ringan yaitu sebesar 70,59 V. Hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 11 sebagai berikut.

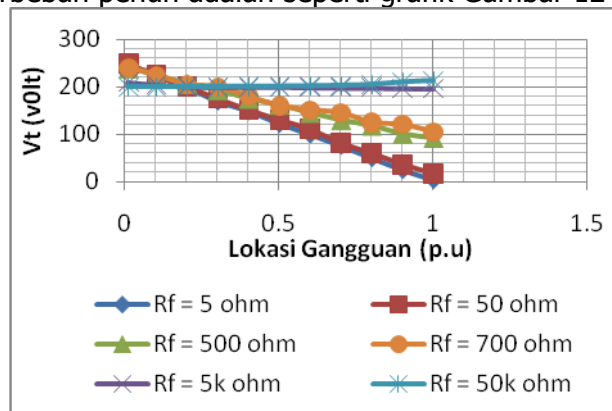


Gambar 11. Grafik tegangan harmonik ketiga di netral kondisi beban ringan.

Gambar 11 menunjukkan tegangan harmonik ketiga di netral generator (V_n) sebagai fungsi dari jarak gangguan dan tahanan gangguan. Saat resistansi gangguan rendah, tegangan di dekat titik netral bernilai mendekati nol, sedangkan gangguan di titik terminal tegangannya bernilai 70,59 Volt. Saat gangguan resistansi rendah, tegangan harmonik ketiga (V_n) linear terhadap jarak gangguan. Jika resistansi gangguan tinggi (5 k Ω ohm dan 500 k Ω), seharusnya tegangan harmonik ketiga yang didapatkan lebih atau sama dengan tegangan harmonik ketiga saat kondisi normal. Skema tegangan kurang dapat bekerja dengan baik jika tegangan gangguan hubung tanah stator mempunyai resistansi rendah. Untuk menentukan besaran tegangan harmonik ketiga, tegangan harmonik ketiga harus di-*setting* di atas atau lebih besar dari tegangan harmonik saat terjadi gangguan di netral, akan tetapi harus di bawah atau lebih kecil dari tegangan harmonik ketiga minimum saat generator dalam kondisi tanpa gangguan (Julian, 2006). Tegangan harmonik ketiga minimum di netral yang didapat sebesar 44,07 volt. Rele tegangan harmonik ketiga dapat disesuaikan pada *range* 5 – 10 volt, sehingga, *setting* rele *undervoltage* sebesar 35 – 40 volt.

3.3.1.1 Skema tegangan lebih

Pada metode tegangan lebih, tegangan harmonik ketiga diukur pada sisi terminal generator. Simulasi dilakukan pada tiga keadaan pembebanan yaitu beban nol, beban ringan, dan beban penuh. Skema ini didasarkan pada keadaan tegangan harmonik ketiga pada sisi terminal generator mengalami kenaikan ketika gangguan terjadi dekat titik netral, sehingga situasi terburuk terjadi saat generator menghasilkan tegangan harmonik ketiga. Kondisi maksimum pada kondisi berbeban penuh yaitu sebesar 247 Volt. Hasil Simulasi pada keadaan generator berbeban penuh adalah seperti grafik Gambar 12 di bawah ini.



Gambar 12. Grafik Tegangan Harmonik ketiga di terminal saat beban penuh.

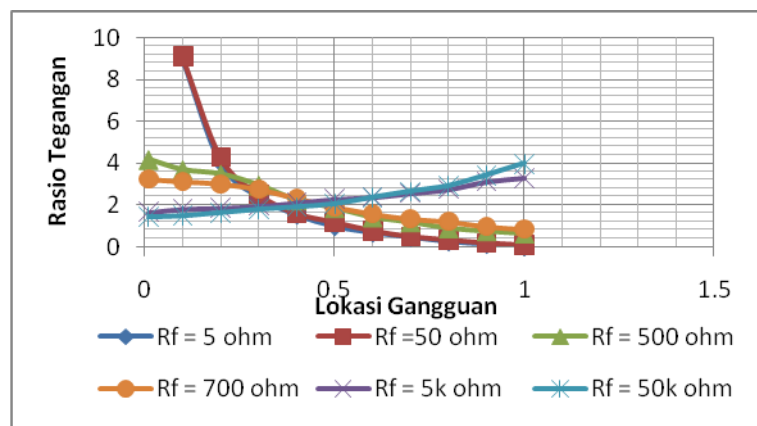
Pada Gambar 12 di atas, jika resistansi gangguan rendah, tegangan harmonik ketiga linier ke bawah terhadap lokasi gangguannya. Ketika resistansi gangguan naik, tegangan harmonik ketiga sepanjang belitan stator akan semakin konstan dan tegangan harmonik ketiga yang dihasilkan akan semakin dekat dengan tegangan harmonik ketiga saat kondisi normal. Untuk menentukan besaran tegangan harmonik ketiga. Tegangan harmonik ketiga disisi terminal saat kondisi normal didapatkan sebesar 125,81 Volt saat beban penuh. Jadi rele tegangan lebih dapat di-*setting* di atas nilai tersebut yaitu sebesar 130 – 135 Volt.

3.3.1.2 Skema Rasio Tegangan

Pada skema ini, tegangan harmonik ketiga di netral dan terminal generator diukur. Rasio tegangan yang dipakai dalam simulasi adalah :

$$Rasio = \frac{[V_{3t}]}{[V_{3n}]}$$

Simulasi juga dilakukan pada tiga jenis pembebanan yaitu beban nol, beban ringan, dan beban penuh.



Gambar 13. Grafik Rasio Tegangan Harmonik ketiga saat beban ringan

Gambar 13 di atas merupakan grafik rasio tegangan saat beban ringan. Untuk melindungi belitan stator dekat netral generator, *setting* rasio tegangan yang digunakan adalah lebih besar dari 0,81, dimana *setting* rasio tersebut didapatkan dari V_{3t}/V_{3n} saat kondisi normal. Dapat dilihat pada grafik bahwa daerah yang tidak terlindungi adalah di atas 60 % dari netral generator. Hal ini disebabkan karena rasio tegangan untuk daerah di atas 60 % berada di bawah 0,81.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, penulis dapat menyimpulkan :

1. Besar perubahan tegangan harmonik ketiga saat skema tegangan kurang adalah sebesar 35 – 40 Volt, dan perubahan tegangan harmonik saat skema tegangan lebih adalah sebesar 130 – 135 Volt.
2. Nilai rasio tegangan harmonik ketiga di titik terminal dan netral adalah sebesar 0,81. Jika dilihat di grafik skema ini dapat melindungi 60 % belitan stator dari titik netral ke titik terminal sehingga skema ini paling efektif digunakan.
3. Jika metode proteksi konvensional melindungi 0-95 % belitan stator dari titik terminal ke titik netral, dan dikombinasikan dengan metode tegangan harmonik ketiga skema rasio tegangan yang melindungi 0-60% dari titik netral ke terminal, maka keseluruhan belitan stator dapat terlindungi

DAFTAR PUSTAKA

- Julian, R. (2006). *100% Stator Graound Protection – Comparison of Two Methods*, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund Institute of Technology. Spain.
- Gilany, M. (2002). *Generator stator winding protection with 100% enhanced sensitivity*, Electrical power & energy systems 24, pp 167172.
- Mathworks. (2004). *MATLAB 7 Simulink 6, User Guide*, Mathworks, USA.
- Schlake, R.L, Buckley, G.W, McPherson, G. (1981). *Performance of third harmonik ground fault protection schemes for generator stator windings*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No, &, July 1981, pp. 3195-3202
- Klingerman, N. (2015). *Understanding Generator Stator Ground Fault and Their Protection Schemes*. Engineering Laboratories, Inc. Washington. 2015.
- Mahendra, D. (2009). *Studi Proteksi Gangguan Hubung Tanah pada Stator Generator menggunakan Metode Tegangan Harmonik Ketiga*. Jurusan Teknik Elektro Universitas Sumatera Utara. Medan.