

Kecuraman Arus Gangguan Generator Sinkron

(The Decay of Fault Current from Synchronous Generator)

Aulia,ST., Dr. Ir. Refdinal Nazir,MSc and Heru Dibiyo Laksono,ST.

ABSTRACT

In order to simulate the fault current from synchronous generator, we can use many available softwares, but each software has the limitations due to so many factors that can influence the non-linearity of the current during the fault. In this project I adopt the established model of faulted synchronous generator from some textbooks and then use Matlab to simulate the generator. The simulations show that the decay of fault current can be modelled and simulated without difficulty.

Untuk mensimulasikan fenomena arus gangguan dari generator sinkron, bisa digunakan bermacam-macam perangkat lunak siap jadi. Masing-masing piranti lunak tersebut mempunyai keterbatasan karena beberapa faktor yang dapat mempengaruhi ketidak linearan arus selama gangguan. Dalam penelitian ini di pergunakan model yang telah ada pada beberapa teksbook dan kemudian digunakan piranti lunak Malab untuk mensimulasikannya. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa kecuraman arus gangguan dapat dimodelkan dengan mudah tanpa mengalami bayak kesulitan.

PENDAHULUAN

Gejala gangguan arus listrik selalu menarik untuk diteliti. Hal ini disebabkan kontribusi arus gangguan ini terhadap unjuk kerja generator sewaktu dan setelah gangguan terjadi. Selama arus gangguannya kecil, ini tidak akan mengganggu unjuk kerja mesin tersebut, tetapi arus gangguan yang besar kemungkinan akan merusak generator itu sendiri. Dan adalah suatu kenyataan bahwa arus gangguan itu seringkali jauh lebih besar dari nilai nominal arus *steady state* dan sulit sekali diprediksi. Hal ini seringkali dikeluhkan oleh pengguna generator listrik.

Untuk mengantisipasi kerugian sebagai akibat arus gangguan yang sangat besar, penting sekali dilakukan perhitungan arus gangguan dari suatu generator. Berdasarkan perhitungan ini akan diketahui karakteristik arus gangguan dari generator tersebut, sehingga rancangan sistem proteksi terhadapnya akan bisa dilakukan dengan lebih baik.

Dalam penelitian ini, tim peneliti membatasi permasalahan hanya untuk meneliti kecuraman arus gangguan generator sinkron, sistem diasumsikan tidak mengalami kejenuhan, tidak mempunyai pengatur tegangan otomatis dan tipe gangguan adalah gangguan tiga fasa simetris dan gangguan satu fasa ke tanah. Diasumsikan juga bahwa tegangan sebelum gangguan adalah tetap dan tidak ada sumber tegangan lain selama gangguan. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bahasa Matlab.

Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, tim peneliti membatasi permasalahan hanya untuk meneliti kecuraman arus gangguan generator sinkron, sistem diasumsikan tidak mengalami kejenuhan, tidak mempunyai pengatur tegangan otomatis dan tipe gangguan adalah gangguan tiga fasa simetris dan gangguan satu fasa ke tanah. Diasumsikan juga bahwa tegangan sebelum gangguan adalah tetap dan tidak ada sumber tegangan lain selama gangguan.

Perumusan Masalah

Gejala gangguan arus listrik selalu menarik untuk diteliti. Hal ini disebabkan kontribusi arus gangguan ini terhadap unjuk kerja generator sewaktu dan setelah gangguan terjadi. Selama arus gangguannya kecil ini tidak akan merusak unjuk kerja mesin, tetapi arus gangguan yang besar kemungkinan akan merusak generator itu sendiri. Dalam kondisi seperti ini perhitungan arus gangguan sangat penting sekali dilaksanakan, sebagai titik awal untuk merancang sistem proteksi terhadap peralatan listrik.

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Tujuan Penelitian

1. Menganalisa kecuraman arus gangguan dari generator sinkron.
2. Menganalisa pengaruh reaktansi generator terhadap kecuraman arus gangguan
3. Untuk mengantisipasi pengaruh kecuraman arus ini terhadap generator

Manfaat Penelitian

- Bagi Peneliti :

1. Melatih kemampuan akademis dalam proses penelitian pada bidang mesin-mesin listrik dan arus gangguan.
2. Sebagai bahan tambahan untuk memperkaya materi perkuliahan pada bidang mesin-mesin listrik dan arus gangguan
3. Menjadi dasar untuk membuat atau mengembangkan model-model baru dalam penelitian-penelitian berikutnya.

- Bagi Praktisi

Sebagai salah satu alternatif untuk menghitung kecuraman arus gangguan dalam merencanakan pembuatan generator sinkron.

Metodologi

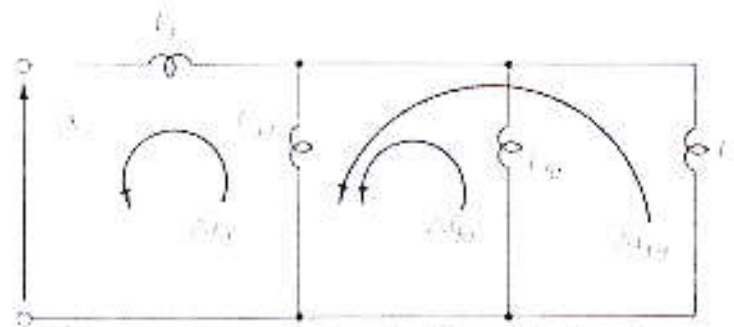
- Studi literatur dan formulasi model dari generator sinkron terganggu
- Pemrograman hasil formulasi
- Uji coba dan pemeriksaan program.

TINJAUAN PUSTAKA

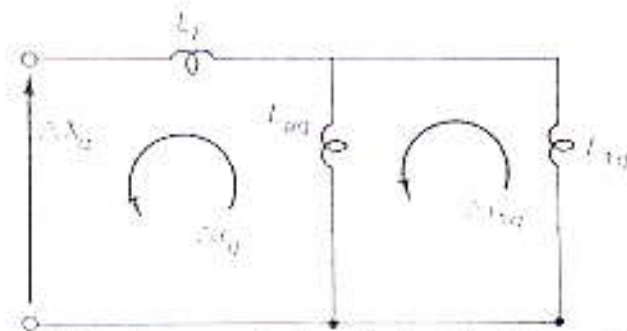
Rangkaian ekivalen generator sinkron selama gangguan

Rangkaian suatu generator sinkron selama gangguan dapat diperlihatkan dalam gambar 1 di bawah ini.

Dimana:



(a) Direct-sumbu equivalent circuit's model of synchronous generator



(b) Quadrature-sumbu equivalent circuit's model of synchronous generator

- L_d adalah reaktansi jangkar
- L_{ad} adalah reaktansi magnetisasi pada sumbu-d
- L_{qd} adalah reaktansi kumparan medan pada sumbu-q
- L_{1d} adalah reaktansi belitan penyangga pada sumbu-d
- L_{aq} adalah reaktansi magnetisasi pada sumbu-q
- L_{1q} adalah reaktansi belitan penyangga pada sumbu-q
- $\Delta\lambda_d$ adalah *flux linkage* pada sumbu-d belitan jangkar
- Δi_{1d} adalah arus sumbu-d pada belitan penyangga
- Δi_{ad} adalah arus sumbu-d pada belitan medan
- Δi_{ad} adalah arus magnetisasi pada belitan medan
- $\Delta\lambda_q$ adalah *flux linkage* sumbu-q pada belitan jangkar
- Δi_{aq} adalah arus sumbu-q pada belitan medan

Δi_{iq} adalah arus sumbu-q pada belitan penyangga.

Generator sinkron dimodelkan sebagai rangkaian ekuivalen pada saat kondisi terganggu. Pada umumnya reaktansi belitan utama, belitan medan and belitan penyangga diabaikan. Hal ini dikarenakan nilai-nilai reaktansi tersebut sangat kecil sekali, dan alasan lain adalah untuk penyederhanaan model. Walaupun demikian reaktansi-reaktansi tersebut tetap diperlukan dalam perhitungan konstanta waktu.

Sebelum arus gangguan dihitung, kita juga perlu menghitung reaktansi pada masing-masing jenis gangguan dari generator terkait.

Reaktansi ekuivalen pada sumbu-d selama periode subtransient berdasarkan gambar 1 adalah

$$X_d'' = L_d + \left(\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{kd}} \right)^{-1} \quad (1)$$

dan untuk periode transient adalah

$$X_d' = L_d + \left(\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fd}} \right)^{-1} \quad (2)$$

untuk steady state adalah

$$X_d = L_d + L_{ad} \quad (3)$$

X_d' biasa bernilai antara 0.1 to 0.25 per unit, dan X_d'' adalah 0.1 p.u. lebih kecil dari X_d' terkait.

Konstanta waktu

Konstanta waktu didefenisikan sebagai ratio perbandingan antara reaktansi dan resistansi terkait dari kondisi mesin. Pada umumnya ada tiga konstanta waktu yang dihitung yaitu:

- Periode subtransient, T'' .
- Periode transient, T' .
- Kondisi *steady state* – kondisi operasi sinkron, T .

Untuk perhitungan konstanta waktu dipergunakan persamaan di bawah ini.

$$T_{d0}'' = \frac{L_{fd} + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}}}{\omega R_{fd}} \quad (4a)$$

$$T_d' = \frac{L_{fd} + \frac{L_{ad}L_{fd}L_{kd}}{L_{ad}L_{kd} + L_{ad}L_{fd} + L_{kd}L_{fd}}}{\omega R_{fd}} \quad (4b)$$

$$T_{di} = \frac{L_{jd} + L_{ad}}{\omega R_{jd}} \quad (5a)$$

$$T_{d'} = \frac{L_{jd} + \frac{L_{ad}L_q}{L_{ad} + L_q}}{\omega R_{jd}} \quad (5b)$$

$$T_{dq} = \frac{L_{dq} + L_{ad}}{\omega R_{jd}}$$

$$T_{d''} = \frac{L_{dq} + \frac{L_{ad}L_q}{L_{dq} + L_q}}{\omega R_{jd}} \quad (6)$$

$$T_d = \frac{2X_d'X_q'}{\omega R_d(X_d' + X_q')} \quad (7)$$

Dimana:

R_{jd} adalah resistansi belitan penyangga pada sumbu-d

R_{jd} adalah the resistansi belitan medan sumbu-d.

R_{dq} adalah resistansi belitan penyangga sumbu-q

R_{dq} adalah resistansi belitan medan sumbu-q.

Arus gangguan generator sinkron

Kecuraman arus gangguan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut [5]:

$$i_d = E \left[\left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\lambda_d t} + \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d''} \right) e^{-\lambda_d'' t} + \frac{1}{X_d} \right] - \frac{E}{X_d} \cos(\omega_s t) e^{\lambda_d} \quad (8a)$$

$$i_q = -\frac{E}{X_q} \cos(\omega_s t) e^{\lambda_q} \quad (8b)$$

dan arus gangguan pada fasa a adalah:-

$$i_a = i_d \cos(\omega_s t + \lambda) + i_q \sin(\omega_s t + \lambda) \quad (9)$$

$$i_a = E \left[\left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\lambda_d t} + \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d''} \right) e^{-\lambda_d'' t} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_s t + \lambda) - \frac{E}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) \cos(\lambda) e^{\lambda_d} - \frac{E}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) \cos(2\omega_s t + \lambda) e^{\lambda_d} \quad (10a)$$

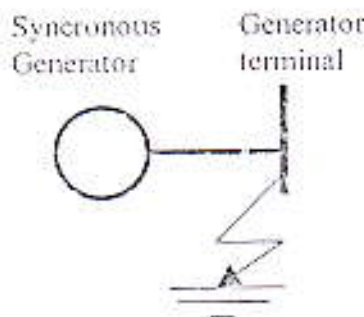
Untuk mesin rotor bundar dimana $X_d = X_q$, persamaan diatas disederhanakan menjadi :

$$i_a = E \left[\left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\lambda t} + \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{j\lambda t} + \frac{1}{x_d} \right] \cos(\omega_s t + \lambda) - \frac{E}{x_d'} \cos(\lambda) e^{j\lambda t} \quad (10b)$$

Persamaan (10a) and (10b) memberikan nilai-nilai arus gangguan yang mungkin mengalir bila gangguan terjadi pada terminal generator. Untuk gangguan yang jauh dari terminal generator impedansi ($R_e + jX_e$) akan muncul seri dengan reaktansi generator dan konstanta waktu perlu di modifikasi.

MODEL DAN SIMULASI

Model dari sistim yang disimulasikan dapat dilihat pada gambar berikut. Rangkaian terdiri dari sebuah generator serempak yang terhubung ke sebuah busbar tunggal. Gangguan diasumsikan terjadi pada busbar ini. Jenis gangguan adalah gagaun tiga fas ismetris dan gangguan satu fasa ke tanah.



Formula yang digunakan

Berdasarkan persamaan 10a dan persamaan 10b tersebut di atas maka dilakukan perhitungan arus gangguan untuk gangguan tiga fasa simetris dan gangguan satu fasa ke tanah pada terminal generator sebagai berikut:

Besar arus gangguan tiga fasa simetris pada terminal [3]

$$i_a = E \left[\left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\lambda t} + \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{j\lambda t} + \frac{1}{x_d} \right] \cos(\omega_s t + \lambda) - \frac{E}{2} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) \cos(\lambda) e^{j\lambda t} - \frac{E}{2} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) \cos(2\omega_s t + \lambda) e^{j\lambda t} \quad (11)$$

Arus Gangguan satu fasa ke tanah [12]

$$i_a = \frac{3\sqrt{2}|E|}{X_{d1} + X_2 + X_0} \sin(\omega t + \theta) - \frac{3\sqrt{2}|E|}{X_d^2 + X_2 + X_0} \sin \theta e^{j\lambda t} + i_{acc} \quad (12)$$

$$X_{d1} = \left\{ \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\lambda t} + \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{j\lambda t} + \frac{1}{x_d} \right\}^{-1} \quad (13)$$

Selama simulasi akan diamati kecenderungan arus gangguan generator untuk kedua jenis gangguan tersebut yang kemudian akan dianalisa.

HASIL SIMULASI

Three-phase fault current from synchronous generator

Berdasarkan hasil simulasi, kecuraman arus gangguan tiga fasa dan kecuraman arus gangguan satu fasa ke tanah dapat diperlihatkan pada gambar di bawah ini. Perlu

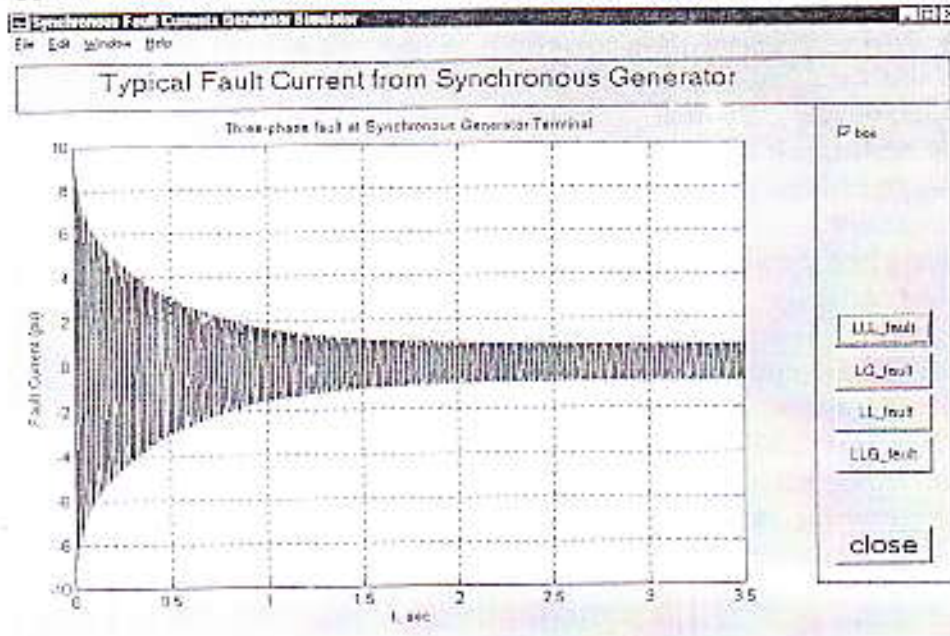


Figure 2 Three-phase fault at the synchronous generator terminal

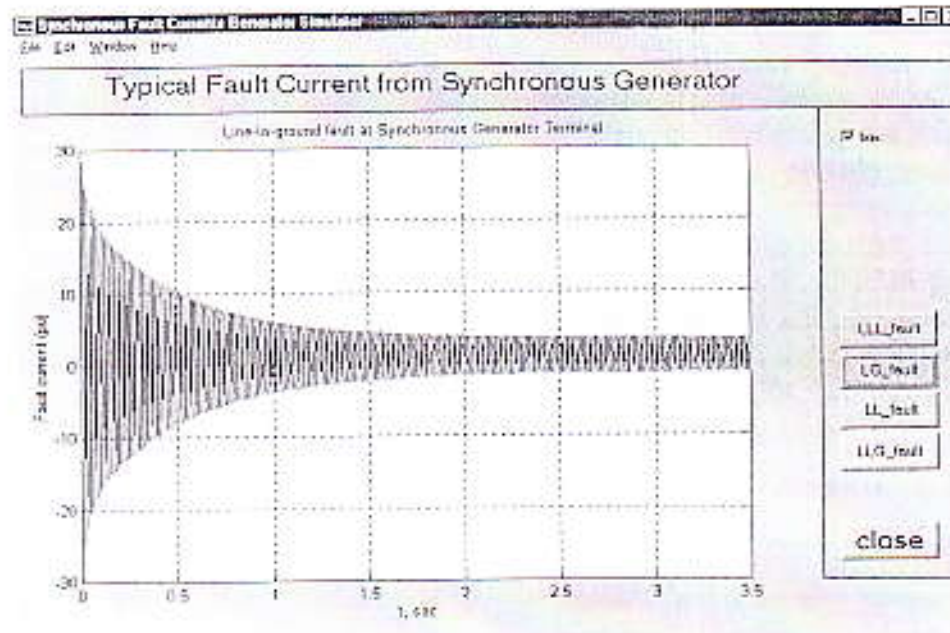


Figure 3 Line-to-ground fault at the synchronous generator terminal

diingatkn lagi bahwa simulasi ini untuk generator sinkron tanpa beban. Nilai awal arus gangguan subtransient adalah 10 pu. Untuk gangguan tiga fasa simetris dan 30 pu untuk

gangguan satu fasa ke tanah. Kemudian nilai ini menurun dan mengecil dan melewati tahap transient dan kemudian stabil setelah 1,5 detik pada nilai 1 pu.

ANALISA

Arus dari belitan medan dan belitan penyangga akan menurun setelah gangguan terjadi karena arus pada armature melawan arus eksitasi. Rata-rata perubahan masing-masing kedua belitan ini akan sangat tergantung sekali kepada konstanta waktu masing-masing belitan. Karena kandungan tembaga pada belitan penyangga lebih kecil dari kandungan tembaga belitan medan, resistansi belitan penyangga akan lebih terpengaruh oleh belitan primer dibandingkan belitan medan. Dengan demikian konstanta waktu belitan penyangga akan jauh lebih singkat. Nilai reaktansi kedua belitan akan cenderung sama secara umum akibatnya arus pada belitan penyanggan akan menurun lebih cepat dari belitan medan.

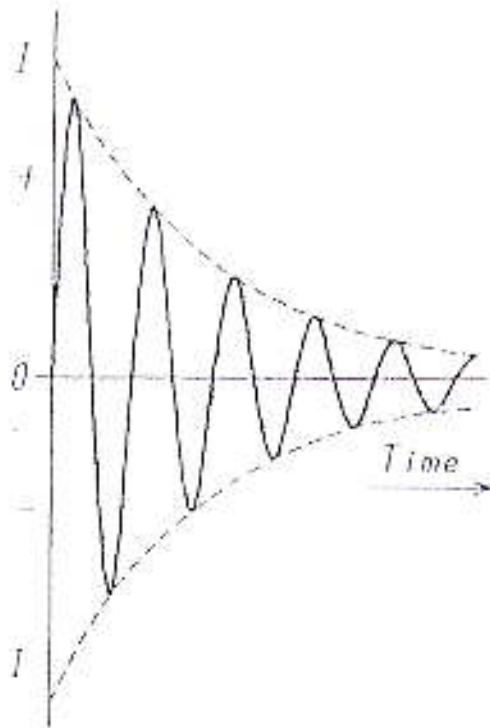


Figure (4a) Trace of current vs. time on a three-phase short-circuit fault [5]

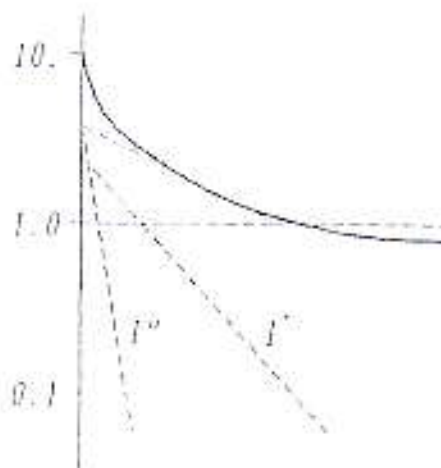


Figure (4b) The current envelope of figure (4a) on linear scale [5]

Untuk generator yang memiliki eksitasi tetap, nilai awal komponen simetris arus ditentukan oleh reaktansi pada gambar 1. Rata-rata penurunan arus gangguan ditentukan oleh konstanta subtransient atau belitan penyangga, L/R sehingga arus setelah gangguan akan menurun dengan sangat cepat. Setelah waktu subtransient terlewat maka pada periode yang berikutnya yaitu periode transient, rata-rata penurunan arus gangguan akan sedikit lebih lambat yang dipengaruhi oleh konstantan belitan medan L/R . Setelah periode transient selesai kemudian arus akan konstan tergantung kepada reaktansi sinkron generator, yaitu oleh belitan jangkar L/R .

A. Pengaruh reaktansi subtransien dan transient

Untuk memahami pengaruh reaktansi-reaktansi ini kita perlu mempelajari arus generator sesaat setelah gangguan terjadi. Jejak tipikal arus puncak keluaran generator sesaat setelah gangguan tiga fasa simetris terjadi dengan eksitasi tetap dapat dilihat pada gambar 4a. Sekarang ini pengoperasian

generator dengan eksitasi tetap hanya tujuan pengetesan saja, dan sangat jarang suatu generator dioperasikan tanpa AVR. Suatu jejak peunan

Gambar (9b) memperlihatkan jejak arus yang diplot dengan skala linear. Terlihat bahwa kurva penurunan terdiri dari tiga komponen yang mana-masing-masing komponen hampir mendekati garis lurus. Daerah subtransient yang merupakan bagian pertama lebih pendek dibandingkan daerah transient. Sedangkan kompone terakhir yaitu daerah steady state terus berlangsung selama simulasi atau pengujian dilakukan.

B. Pengaruh lokasi gangguan terhadap penurunan arus gangguan

Untuk gangguan yang terjadi jauh dari terminal generator, impedansi eksternal ($R_e + jX_e$) akan muncul seri dengan reaktansi mesin dan kemudian konstanta waktu perlu disesuaikan dengan lokasi gangguan terjadi. Jika lokasi gangguan sangat jauh dari terminal generator, dan reaktansi saluran sangat besar, penurunan arus gangguan akan sangat kecil dan konstantan waku akan sanga besar dan arus gangguan tidak akan mencapai generator.

KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi dan analisis terlihat cukup jelas bahwa penurunan arus gangguan generator sinkron dikontrol oleh reaktansinya yang bisa dilihat sebagai reaktansi sumbu-d untuk reaktansi subtrasien dan transien.

Reference

1. *B. M. Weedy; Electric Power System, John Wiley & Sons, Southampton, 1978*
2. *Malukutla Sarma; Electric Machines "steady state theory and dynamic performance", West Publishing Co., USA, 1985*
3. *Hadi Saadat; Power System Analysis, McGraw-Hill, New York, 1999*
4. *Paul M. Anderson; Analysis of Faulted Power System, IEEE Press, New York, 1995*
5. *A. E. Eftymiadis; Advanced Power System Modelling 'Lecture Note', UMIST, 1997*
6. *Vlado Ostovic; Computer Aided Analysis of Electric Machines, Prentice Hall, Cambridge, 1994*
7. *Robert L. Ames; A.C. Generators "Design and Application", John Wiley & Sons, 1990*
8. *N. Jenkins; Lecture Note of Embedded Generation, Umist, Manchester, 1999.*
9. *A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umar; Electric Machinery, 5th edition, McGraw Hill, USA, 1990*
10. *Paul M. Anderson & A.A. Fouad; Power System Control and Stability, IEEE Press, New York, 1993*
11. *Glover Sarma; Power System Analysis and Design, PWS Publishing Company, Boston, 2nd edition, 1994*
12. *John R. Smith and Meng-Jen Chen; Three-phase Electrical Machine Systems, Computer Simulation, John Wiley & sons, England, 1993*