



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Gibson Hilman Maruhum Sianipar

**PERKEMBANGAN PERHITUNGAN
HUBUNG SINGKAT DI SISTEM
TENAGA LISTRIK**

29 Januari 2016
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
29 Januari 2016

Profesor Gibson Hilman Maruhum Sianipar

**PERKEMBANGAN PERHITUNGAN
HUBUNG SINGKAT DI SISTEM
TENAGA LISTRIK**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis Prof. G.

Judul: PERKEMBANGAN PERHITUNGAN HUBUNG SINGKAT DI SISTEM TENAGA LISTRIK
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB, tanggal 29 Januari 2016.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Gibson Hilman Maruhum Sianipar
PERKEMBANGAN PERHITUNGAN HUBUNG SINGKAT DI SISTEM TENAGA LISTRIK
Disunting oleh Gibson Hilman Maruhum Sianipar

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2016

vi+48 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-8468-87-9

1. Teknologi 1. Gibson Hilman Maruhum Sianipar

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan, Pencipta segala yang ada, Khalik langit dan bumi yang dengan berkat dan rachmatnya karya orasi ilmiah ini dapat diselesaikan.

Orasi ilmiah ini disampaikan sebagai tanggung jawab penulis pada bangsa dan negara Indonesia karena mendapat kepercayaan diangkat dalam jabatan guru besar. Didalamnya dibebaskan perkembangan metoda perhitungan hubung singkat di sistem tenaga listrik dimulai dari metoda model sederhana yakni impedansi tetap sampai dengan simulasi dinamis dengan model yang lengkap. Tentu orasi ilmiah ini dibuat sejelasa mungkin agar dapat mencakup pembaca seluas mungkin, pejabat pemerintah, praktisi teknik tenaga listrik, terutama bagi para mahasiswa yang akan mengambil studi magister dan doctoral.

Semoga tulisan ini bermanfaat untuk bahan rujukan dan inspirasi bagi khalayak pembaca semua.

Bandung, Januari 2016

Gibson H. M. Sianipar

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
1. PENDAHULUAN	1
2. METODA STATIS MENGHITUNG ARUS HUBUNG-SINGKAT..	3
3. SIMULASI DINAMIS SISTEM TENAGA DALAM HUBUNG SINGKAT	12
4. PERHITUNGAN HUBUNGAN SINGKAT SECARA DINAMIS ..	24
5. PENUTUP	40
6. UCAPAN TERIMA KASIH	43
7. DAFTAR PUSTAKA	44
CURRICULUM VITAE	47

PERKEMBANGAN PERHITUNGAN HUBUNG SINGKAT DI SISTEM TENAGA LISTRIK

1. PENDAHULUAN

1.1 Kebutuhan Analisis Gangguan

Dalam perancangan untuk menentukan kapasitas, dimensi dan penyetelan sistem proteksi peralatan listrik di jaringan tenaga listrik perlu melakukan simulasi untuk mengetahui tanggapan sistem tenaga pada saat diterpa berbagai jenis gangguan. Simulasi yang paling mendasar adalah untuk mengetahui berapa besar arus hubung singkat yang akan timbul pada saat gangguan. Kajian hubung singkat perlu dilakukan pada saat konsepsi untuk yang masih baru dan saat ada perluasan berupa tambahan saluran dan atau tambahan pusat pembangkit. Pada tahap operasi pun kajian hubung singkat diperlukan jika oleh satu sebab diperlukan manuver jaringan.

Penambahan pembangkit ke sistem dengan cara menghubungkan langsung ke jaringan akan selalu menambah daya hubung singkat. Ini masalah besar jika peralatan sistem tenaga khusus pemutus daya kapasitasnya sudah terlampaui. Situasi ini sedang akan atau mungkin sudah tercapai di berbagai jaringan kita. Yang pasti penambahan pembangkit-pembangkit yang direncanakan 35 GW pasti akan membawa serta keadaan yang tak diinginkan itu. Tentu ada jalan keluar dari masalah ini dari mulai yang cara *brute force* mengganti peralatan dengan kapasitas lebih tinggi sampai dengan teknik-teknik manipulasi seperti memasang reaktor seri berreaktansi dwi-karakter (memakai inti besi jenuh) sampai dengan penggunaan *back to back* HVDC (Transmisi Tegangan Tinggi Arus

Searah yang adu-punggung)[15]. Tanpa upaya-upaya membatasi daya hubung singkat, listrik kita nanti akan makin sering mengalami pemadaman dan dalam kasus kegagalan pemutus daya umumnya bersifat total.

Banyak jenis gangguan yang dapat menerpa sistem tenaga seperti kegagalan komponen baik karena usia atau kapasitas yang tak cukup atau akibat faktor luar seperti sambaran kilat ke peralatan. Gangguan karena kesalahan pelaksana lapangan pun bisa terjadi seperti memasukkan seksi yang baru selesai dipelihara tapi lupa membebaskannya dari hubungan ke bumi. Prosedur keselamatan kerja mewajibkan setiap kali seksi saluran dilepas dari sistem sebelum dilakukan tindakan harus terlebih dahulu menghubungkan kawat saluran ke bumi agar sisa muatan yang masih ada terbuang habis.

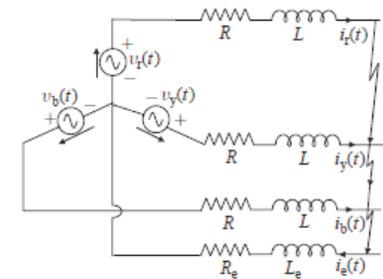
Jika gangguan berakibat peralatan gagal berfungsi maka ujung-ujungnya niscaya sebuah hubung singkat. Hubung singkat adalah gangguan yang paling sering dipelajari mengingat dampaknya yang fatal terhadap peralatan maupun terhadap keutuhan sistem. Gangguan primer yang tak segera diamankan dapat memperanakkan banyak gangguan-gangguan sekunder di peralatan lain yang pada gilirannya berakibat pecahnya kesatuan komponen-komponen karena secara berantai memisahkan diri atas perintah alat-alat proteksi. Sistem tenaga lajimnya tersusun dari komponen-komponen seperti generator pembangkit daya, transformator daya penaik/penurun tegangan dan saluran sengaja dipisah satu dengan lainnya dengan peralatan pemutus daya atau sekring agar dapat memisahkan setiap satu dari komponen tersebut jika sedang mengalami gangguan dari sistem. Pemutus daya ini tentu akan bekerja

memutus rangkaian bila rele-rele pengaman telah merasakan ada besaran-besaran ukurnya telah melampaui batas.

2. METODA STATIS MENGHITUNG ARUS HUBUNG-SINGKAT

2.1 Terminologi bentuk gelombang arus hubung-singkat dan arus pemutusan.

Gambar 1 di bawah ini menunjukkan rangkaian sebuah sumber tegangan 3-fasa yang dihubungkan singkatkan melalui sebuah impedansi. Rangkaian ini mewakili dalam bentuk yang sangat di sederhanakan dari sebuah generator yang mengalami hubung singkat yang menjadi acuan perhitungan hubung singkat di standar internasional yang ada sekarang.



Gambar 1. Rangkaian sumber tegangan 3-fasa yang terhubung singkat.

Sumber tegangan tiga fasa seimbang :

$$\left. \begin{aligned} V_a(t) &= \sqrt{2}V_{rms} \sin(\omega t + \varphi) \\ V_b(t) &= \sqrt{2}V_{rms} \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) &= \sqrt{2}V_{rms} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad 2.1$$

Jika hubung singkat melekat 3-fasa terjadi pada $t = 0$ arus hubung singkat yang terjadi akan mengikuti persamaan diferensial berikut :

$$L \frac{di_i(t)}{dt} + Ri_i(t) = v_i(t), \quad i = a, b, c \quad (2.2)$$

Penyelesaian persamaan (2.2) adalah :

$$i_i(t) = \sqrt{2}I_{rms} \left\{ \sin \left[\omega t + \varphi_i - \arctan \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \right\} - \sin \left[\varphi_i - \arctan \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \times \exp \left[\frac{-t}{(L/R)} \right] \quad (2.3)$$

dengan

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.3) di atas dapat dipisahkan atas dua unsur yaitu unsur bolak-balik dan unsur searah :

$$i_i(t) = i_{iac}(t) + i_{idc}(t) \quad (2.5)$$

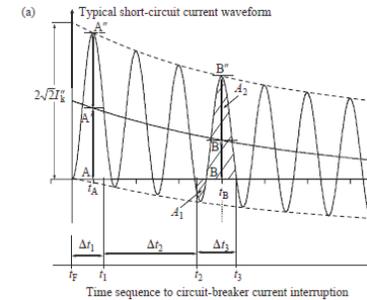
di mana

$$i_{iac}(t) = \sqrt{2}I_{rms} \left\{ \sin \left[\omega t + \varphi_i - \arctan \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \right\} \quad (2.6)$$

$$i_{idc}(t) = -\sin \left[\varphi_i - \arctan \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] \times \exp \left[\frac{-t}{(L/R)} \right] \quad (2.7)$$

Di sini arus bolak-balik $i_{iac}(t)$ nilai efektifnya konstan karena L dianggap konstan atau tidak bergantung waktu. Sementara arus searah $i_{idc}(t)$ besarnya menurun dengan konstanta waktu X/R dengan $X = \omega L/R$.

Perjalanan arus hubung-singkat bersama waktu dapat dilihat dari Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Perjalanan arus hubung-singkat bersama waktu.

Dari gambar beberapa istilah perlu dikemukakan :

- t_F = waktu gangguan hubung singkat terjadi.
- Δt_1 = Waktu rel proteksi
- t_A = Saat puncak awal dari arus hubung-singkat
- t_I = Saat hidupnya rangkaian pemutus pemutus daya.
- Δt_2 = Waktu pembukaan pemutus daya.
- t_2 = Saat pemisahan kontak pemutus daya= saat awal bunga api.
- Δt_3 = Waktu arus bunga api pemutus daya.
- t_3 = Saat akhir pemadaman bunga api.
- t_B = Saat puncak arus sebelum pemutusan arus.
- $2\sqrt{2}I_k''$ = Besar arus teoritis saat terjadi hubung-singkat di t_F di mana I_k'' adalah nilai rms arus hubung-singkat saat $t=t_F$.
- $i_p = AA''$ = puncak awal dari arus hubung-singkat di $t=t_p$ di namakan juga arus puncak 1/2 siklus atau arus pembuat puncak. AA'' = besar unsur arus searah di $t = t_A$ dan $A'A''$ = puncak unsur

arus bolak-balik di $t = t_A$.

$i_b = BB'' =$ puncak arus hubung-singkat di $t = t_B$. $BB' =$ besar unsur arus searah di $t = t_B$ dan $B'B'' =$ puncak unsur arus bolak-balik di $t = t_B$ dan besarnya sama dengan $\sqrt{2}I_b$, di mana I_b adalah nilai rms arus di $t = t_B$.

2.2 Teknik analisis hubung-singkat dengan impedansi konstan.

Kedua standar internasional yaitu IEC dan IEEE menghitung arus hubung singkat menggunakan rangkaian keadaan tunak. Dengan demikian seluruh komponen dinyatakan sebagai impedansi yang konstan sehingga prinsip Thevenin dapat diterapkan. Perubahan induktansi di generator selanjutnya dikoreksi dengan berbagai faktor pengali dan pengaruh ratio R/X jaringan ditentukan dengan menggunakan faktor pengali yang bersifat empiris.

Perhitungan arus hubung singkat dilakukan dengan menggunakan persamaan sistem dalam kerangka impedansi simpul sebagai berikut :

$$V_{sim} = Z_{sim} I_{sim} \quad (2.8)$$

Persamaan tersebut biasanya diturunkan dari persamaan sistem dalam kerangka admittansi simpul

$$I_{sim} = Y_{sim} V_{sim} \quad (2.9)$$

Elemen matriks impedansi persamaan (2.8) semisal Z_{ik} yang biasa di namai impedansi titik hela atau *driving-point impedance* sering disebut juga impedansi ekuivalen Thevenin dapat di buktikan sebagai impedansi ekuivalen rangkaian sistem jika direduksi menjadi satu impedansi yang

terhubung ke simpul k. Dengan demikian maka jika terjadi hubung singkat terpatri di simpul k, arus hubung singkat di simpul k adalah

$$I_k = \frac{V_k^0}{Z_{kk}} \quad (2.10)$$

Nilai yang diperoleh dari (2.10) bergantung pada besaran, y_{Gkr} konduktansi generator di simpul k, yang disertakan ke elemen diagonal (k,k) matriks Y_{sim} di persamaan (2.9), jika itu nilai subtransien maka arus hubung-singkat subtransien, I_k'' , yang didapat, dan jika nilai transien maka arus transien, I_k' .

2.3 Standar IEC 60909[1]

Dasar Standar IEC 60909-0 adalah perhitungan arus hubung-singkat rms simetris awal, I_k'' , untuk semua gangguan dengan metoda berlandaskan sumber tegangan ekivalen di lokasi gangguan seperti telah diperlihatkan di seksi 2.1 dan 2.2 di atas. Tegangan untuk menghitung I_k'' sebagai tindakan antisipasi keadaan awal jika berada di batas atas atau batas bawah di kalikan dengan faktor c sebagai berikut

$$I_k'' = \frac{cV_k^0}{Z_{kk}} \quad (2.11)$$

Contoh tegangan menengah dan tinggi dipakai $c = 1.1$ untuk batas atas dan 1.0 untuk batas bawah. Di samping faktor pengaman c ada berbagai faktor diciptakan untuk kemudahan menghitung beberapa besaran seperti arus puncak terjelma I_p , arus hubung-singkat pemutusan tunak simetris, arus hubung-singkat tunak simetris dan beberapa lainnya.

Untuk menghitung arus puncak I_p dipakai rumus berikut :

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (2.12)$$

$$\kappa = 1.02 + 0.98 \exp[-3/(X/R)] \quad (2.13)$$

Untuk jaringan radial arus puncak terjelma total adalah jumlah arus-arus puncak terjelma individual setiap rangkaian radialnya. Untuk jaringan berjala persamaan (2.12) juga dipakai tapi persamaan (2.13) diubah menjadi :

$$\kappa = 1.02 + 0.98 \exp[-3/(X/R)_i] \quad (2.14)$$

di mana $(X/R)_i$ dihitung berdasar salah satu dari tiga metoda berikut.

Metode A: Hasil bagi X/R seragam

κ dihitung menggunakan hasil bagi X/R terbesar dari semua cabang-cabang jaringan yang menyuntikkan sebagian arus hubung-singkat ke titik gangguan. Metode ini dapat menjurus ke kesalahan yang berarti.

Metode B: Hasil bagi X/R ekuivalen di titik gangguan.

X/R ekuivalen di sini dimaksudkan sebagai R dan X dari impedansi Thevenin di titik gangguan. Diperlukan sebuah faktor keamanan 1.15 untuk mengompensasi estimasi yang terlalu rendah arus searah karena beragamnya nilai X/R dari cabang-cabang jaringan dan sumber-sumber. Dengan demikian :

$$i_p = 1.15\kappa\sqrt{2}I_k'' \quad (2.15)$$

Faktor gabungan 1.15κ harus dibatasi pada 1.8 dan 2.0 untuk masing-masing tegangan rendah dan tegangan tinggi.

Metode C: Frekuensi ekuivalen f_c .

Mulanya besar reaktansi jaringan diskala dari nilai pada frekuensi tenaga f ke nilai frekuensi yang dkecilkan f_c dan impedansi Thevenin titik

gangguan dihitung. Jika impedansi yang dihitung di titik gangguan pada f_c untuk rangkaian positif dan nol masing-masing $Z_c^+ = R_c^+ + jX_c^+$ dan $Z_c^0 = R_c^0 + jX_c^0$, hasil bagi X/R di titik gangguan dihitung dari :

$$\frac{X}{R} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{X_c^+}{R_c^+} \right) \cdot \frac{f}{f_c} \\ \left(\frac{2X_c^+ + X_c^0}{2R_c^+ + R_c^0} \right) \cdot \frac{f}{f_c} \end{array} \right. \quad (2.16)$$

di mana f nilai nominal frekuensi sistem (50 atau 60 hz) dan $f_c = 0.4$.

Perhitungan unsur arus searah.

Nilai maksimum unsur arus searah arus hubung-singkat dihitung memakai :

$$i_{dc} = \sqrt{2}I_k'' \exp\left[\frac{-2\pi f t_{min}}{(X/R)_b} \right] \frac{f}{f_c} \quad (2.17)$$

di mana f adalah frekuensi daya dan $(X/R)_b$ adalah nilai X/R dihitung dengan Metode C dengan memperhatikan nilai t_{min} . Tersedia tabel nilai f_c berbagai nilai t_{min} yang tidak disertakan dalam makalah ini.

2.4 Standar Amerika IEEE C37.010[1]

2.4.1 Latar belakang

Standar IEEE untuk perhitungan arus hubung-singkat ini terkait langsung untuk penentuan kapasitas pemutus daya tegangan tinggi ABB yang berdasar pada arus simetris. Sebelum 1964 standar Amerika menggunakan dasar arus total. Standar ini dirancang untuk memberi hasil yang konservatif bagi pemilihan kapasitas pemutus daya. Bentuk gelombang arus hubung-singkat asimetris dianggap memiliki unsur arus

searah maksimum. Standar tidak membedakan jaringan radial atau berjala. Standar hanya menangani perhitungan arus hubung-singkat maksimum dan membedakan antara hubung-singkat dengan peluruhan unsur arus bolak-balik yang cukup berarti atau tidak berarti sesuai dengan sifat hubung-singkat lokal atau jauh dari generator.

2.4.2 Pernyataan sistem dan peralatan

Standar IEEE menggunakan konsep sumbangan generator lokal dan jauh ke gangguan hubung-singkat. Jika reaktansi antara simpul generator dengan titik gangguan melebihi $1.5X_d''$ maka generator dianggap jauh, lain dari itu dianggap lokal. Reaktansi/resistansi urutan negatif dan positif mesin berputar dianggap sama.

Dua jaringan impedansi berbeda dan terpisah diciptakan. Satu untuk menghitung arus puncak yang diistilahkan sebagai "*closing and latching (Momentary)*" dan yang satu lagi untuk menghitung arus pemutusan. Dari jaringan pertama, dihitung arus simetris siklus pertama dan hasil bagi X/R dan dari kedua hasil ini dihitung kemampuan arus puncak. Dari jaringan kedua, dihitung arus pemutusan simetris dan hasil bagi X/R dan dari kedua hasil ini dihitung kemampuan pemutusan. Standar merekomendasikan pemakaian pengali untuk reaktansi mesin untuk memperhitungkan peluruhan arus bolak-balik dan harga yang berbeda diberikan untuk arus puncak dan arus pemutusan.

2.4.3 Teknik Analisis

Standar IEEE termasuk metode berdasar perhitungan hubung-singkat dengan impedansi tetap. Tegangan awal hanya direkomendasikan memakai nilai tertinggi yang tipikal.

Yang agak "ganjil" hasil bagi X/R di titik gangguan nilai R dan X dihitung dari R dan X ekuivalen titik gangguan dari jaringan R dan jaringan X masing-masing. Cara ini diharapkan akan mengoreksi faktor-faktor yang diabaikan seperti konstanta waktu yang berbeda-beda dan kecepatan peluruhan karena arus-arus hubung singkat berjalan melalui berbagai jalur ke titik gangguan.

Dua metode diajukan : pertama metode E/X sederhana dan kedua metode E/X yang lebih rinci dan lebih teliti, dengan memperhitungkan peluruhan dari unsur arus bolak-balik dan arus searah.

2.5 Perbandingan hasil Standar IEC, IEEE dan EMTP

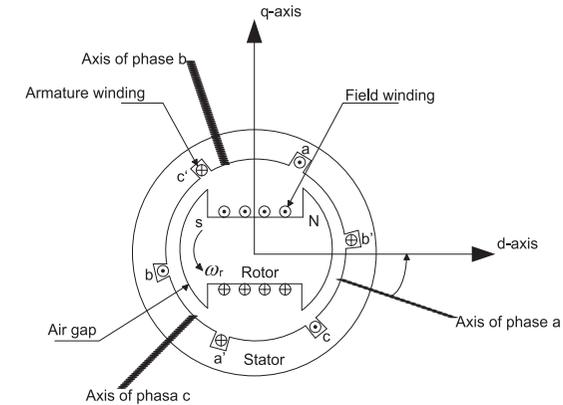
Paper [4] menyajikan sebuah hasil pengujian menggunakan standar IEC, IEEE dan simulasi dinamis dengan EMTP terhadap sebuah kasus jaringan radial dengan generator dan motor sebagai sumber ggl. Meski besaran-besaran yang dihitung dalam standar IEC dan IEEE berbeda namun dengan menggunakan pengali yang tepat dapat dihasilkan besaran yang sama untuk diperbandingkan. Kesimpulan utama yang dinyatakan di [4] bahwa hasil yang diberikan IEC dan IEEE lebih besar dari hasil simulasi EMTP untuk hampir semua arus : I_k'' , i_{pr} , i_b dan i_{basym} dengan demikian aman. Hasil IEEE lebih dekat pada EMTP dibanding IEC. Meski aman standar IEC maupun IEEE nilai yang terlalu besar dari sebenarnya sehingga kurang ekonomis. Untuk rangkaian berjala seperti dilaporkan di [16] hasil standar IEC dan IEEE bisa tidak aman. Hal ini terjadi karena metodologi perhitungan kedua standar terlalu bersandar pada intuisi tanpa pembenaran teori. Dengan alasan inilah maka ke masa depan urgensi simulasi dinamis yang sangat teliti menjadi nyata dilihat

dari keamanan dan ekonomi penentuan kapasitas peralatan sistem tenaga.

3. SIMULASI DINAMIS SISTEM TENAGA DALAM HUBUNG SINGKAT

Simulasi dinamis sistem tenaga ditujukan untuk melihat bagaimana perjalanan besaran-besaran seperti tegangan, arus, daya dan putaran mesin dalam waktu. Bergantung pada fenomena yang menjadi pusat perhatian, pada masa kini simulasi dinamis dapat dibagi tiga : 1. Transien Elektro Magnet, TEM, (mikro detik) ; 2. Transient Hubung Singkat, THS, (milli detik) dan 3. Transien Stabilitas, TS, (detik). Masuk ke kajian TEM adalah meneliti fenomena tegangan lebih akibat penyaklaran dan sambaran kilat. Penulis meneliti fenomena penjalaran gelombang elektromagnet di kabel sebagai disertasi[17]. Tujuan transien stabilitas adalah untuk melihat apakah mesin-mesin sinkron akan tetap serempak bila sistem mengalami gangguan. THS berada antara TEM dan TS dari skala waktu. Yang jadi pengamatan utama di sini adalah arus. THS dan TS sebenarnya menggunakan persamaan-persamaan yang hampir sama. Di TS khusus untuk mesin-mesin, modelnya sangat disederhanakan untuk mengurangi jumlah perhitungan. Untuk THS mesin sinkron atau tidak sinkron dibuat serinci mungkin agar bisa terungkap fenomena transien berskala waktu pendek tapi menghasilkan arus besar. Dengan alasan itulah perlu penulis menjelaskan secara mendasar model mesin sinkron.

3.1 Model Mesin Sinkron[2]



Gambar 3. Skema sebuah generator sinkron.

Untuk kemudahan mengidentifikasi karakteristik mesin sinkron perlu didefinisikan dua sumbu seperti pada Gambar 3 :

- Sumbu langsung d, berpusat dipusat kutup utara;
- Sumbu kuadratur q, 90 derajat listrik mendahului sumbu-d.

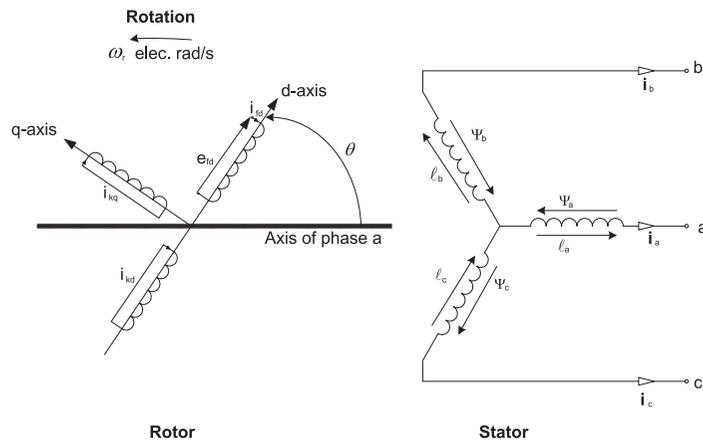
Posisi rotor relatif terhadap stator diukur sebagai sudut q antara sumbu-d dan sumbu magnetik kumparan fasa a. Pilihan sumbu-q mendahului sumbu-d adalah sembarang dan itu menjadi konvensi Standar IEEE.

Persamaan-persamaan mesin sinkron dikembangkan didasarkan pada anggapan-anggapan berikut :

1. Belitan stator terdistribusi secara sinusoid sepanjang celah udara sepanjang menyangkut pengaruh mutual dengan rotor.

2. Alur-alur stator kecil mempengaruhi perubahan induktansi rotor mengikuti posisi rotor.
3. Histeris maknit diabaikan.
4. Kejenuhan maknit diabaikan.

Gambar 6 memperlihatkan rangkaian stator dan rotor sebuah mesin sinkron.



Gambar 4. Skema rangkaian stator dan rotor sebuah generator sinkron.

Besar sudut antara rotor dengan pusat fasa a terus bertambah sesuai dengan

$$\theta = \omega_r t \quad (3.1)$$

Dengan

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.2)$$

Berikut ini notasi yang dipakai menuliskan persamaan-persamaan rangkaian stator dan rotor.

e_a, e_b, e_c = tegangan sesaat fasa stator ke netral.

i_a, i_b, i_c = arus sesaat stator di fasa a, b dan c

e_{fd} = tegangan medan

i_f, i_k, i_h = arus-arus rangkaian medan(f), peredam-peredam sumbu-d(k) & sumbu-q(h)

R_f, R_k, R_h = resistansi rangkaian rotor

l_{aa}, l_{bb}, l_{cc} = induktansi diri kumparan-kumparan stator.

l_{ab}, l_{bc}, l_{ca} = induktansi mutual antara kumparan-kumparan stator.

l_{af}, l_{ak}, l_{ah} = induktansi mutual antara kumparan-kumparan stator dan rotor.

l_{ff}, l_{kk}, l_{hh} = induktansi diri kumparan-kumparan rotor.

R_a = resistansi jangkar per fasa.

p = operator differensial d/dt

Persamaan Rangkaian Stator :

Persamaan-persamaan tegangan dari ketiga fasa adalah :

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{d\psi_a}{dt} + R_a i_a = p\psi_a + R_a i_a \\ e_b &= p\psi_b + R_b i_b \\ e_c &= p\psi_c + R_c i_c \end{aligned} \quad (3.3)$$

Gelung fluksi di kumparan fasa a di setiap saat diberikan sebagai

$$\psi_a = l_{aa} i_a + l_{ab} i_b + l_{ac} i_c + l_{af} i_f + l_{ak} i_k + l_{ah} i_h \quad (3.4)$$

Di sini semua arah positif arus diambil menuju kumparan baik di jangkar, medan dan peredam.

Sesuai definisi induktansi diri kumparan stator, semisal l_{aa} adalah hasil bagi antara fluksi lingkup kumparan fasa a, ψ_a dengan arus fasa a, i_a , dengan semua arus lain nol sedang kita tahu bahwa induktansi itu sebanding dengan permeansi, yang sudah diperlihatkan sebelumnya mengikuti sinusoid harmonisa kedua maka l_{aa} akan bernilai maksimum pada $\theta = 0^\circ$ dan minimum di $\theta = 90^\circ$ dan maksimum kembali di $\theta = 180^\circ$ dan seterusnya. Dengan demikian induktansi diri total fasa a, b dan c dapat ditunjukkan sebagai

$$l_{aa} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta \quad (3.5)$$

$$l_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.6)$$

$$l_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.7)$$

Induktansi mutual antara dua kumparan stator juga memperlihatkan adanya variasi harmonisa kedua akibat dari bentuk rotor. Nilainya selalu negatif dan memiliki nilai absolut terbesar pada saat kutup-kutub utara dan selatan berjarak sama dari pusat kedua kumparan yang bersangkutan. Misalnya, l_{ab} akan bernilai absolut maksimum bila $\theta = -30^\circ$ atau $\theta = 150^\circ$. Induktansi mutual l_{ab} , l_{bc} dan l_{ca} dapat ditunjukkan sebagai :

$$l_{ba} = l_{ab} = -L_{ab0} + L_{ab2} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.8)$$

$$l_{bc} = l_{cb} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\theta - \pi) \quad (3.9)$$

$$l_{ca} = l_{ac} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos\left(2\theta - \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.10)$$

Dapat ditunjukkan bahwa $l_{ab2} = l_{aa2}$ dan $l_{ab2} \propto l_{aa} / 2$.

Besar induktansi antara fasa a dengan struktur rotor juga dapat ditunjukkan sebagai berikut :

$$l_{af} = L_{af} \cos \theta \quad (3.11)$$

$$l_{ak} = L_{ak} \cos \theta \quad (3.12)$$

$$l_{ah} = L_{ah} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = -L_{ah} \sin \theta \quad (3.13)$$

Untuk induktansi mutual antara kumparan fasa b dan rangkaian rotor, θ diganti dengan $\theta - 2\pi/3$ dan untuk fasa c diganti dengan $\theta + 2\pi/3$.

Sekarang pernyataan semua induktansi yang muncul dalam persamaan tegangan stator telah tersedia. Dengan memasukkan pernyataan untuk induktansi-induktansi tersebut ke persamaan (3.4) diperoleh

$$\psi_a = i_a [L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta] + i_b \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right] + i_c \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos\left(2\theta - \frac{\pi}{3}\right) \right] + i_f L_{af} \cos \theta + i_k L_{ak} \cos \theta - i_h L_{ah} \sin \theta \quad (3.14)$$

Dengan cara yang sama,

$$\psi_b = i_a \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right] + i_b \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] + i_c [L_{aa0} + L_{aa2} \cos(2\theta - \pi)] + i_f L_{af} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_k L_{ak} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - i_h L_{ah} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.15)$$

dan

$$\psi_c = i_a \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos\left(2\theta - \frac{\pi}{3}\right) \right] + i_b [L_{aa0} + L_{aa2} \cos(2\theta - \pi)] + i_c \left[L_{aa0} + L_{aa2} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] + i_f L_{af} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_k L_{ak} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - i_h L_{ah} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.16)$$

Persamaan tegangan di rangkaian rotor adalah :

$$e_f = p\psi_f + R_f i_f \quad (3.17)$$

$$0 = p\psi_k + R_k i_k \quad (3.18)$$

$$0 = p\psi_h + R_h i_h \quad (3.19)$$

Rangkaian rotor melihat permeansi yang konstan oleh sebab struktur stator yang silinder. Hanya induktansi mutual antara rotor ke stator yang berubah secara periodis bersama θ sebagaimana dinyatakan dalam persamaan-persamaan.

Gelung fluksi rangkaian rotor dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\psi_f = L_f i_f + L_{kf} i_k - L_{af} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.20)$$

$$\psi_k = L_k i_k + L_{kf} i_f - L_{ak} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.21)$$

$$\psi_h = L_h i_h + L_{ah} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.22)$$

3.2 Transformasi dq0 [2]

Kesulitan dalam menganalisa persamaan-persamaan (3.14)-(3.16) adalah kenyataan bahwa nilai induktansi berubah sebagai fungsi sudut θ yang pada gilirannya berubah pula dengan waktu. Namun dengan transformasi yang cerdas terhadap variabel-variabel stator ternyata dapat diperoleh persamaan-persamaan dengan induktansi-induktansi hasil transformasi yang tak berubah dengan waktu.

Berikut adalah sebuah pilihan transformasi untuk tujuan tersebut :

$$i_d = k_d \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.23)$$

$$i_q = k_q \left[i_a \sin \theta + i_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.24)$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (3.25)$$

Konstanta k_d dan k_q dapat dipilih sembarang, namun pilihan dengan nilai $2/3$, sesuai dengan pilihan banyak orang, akan banyak menyederhanakan koefisien-koefisien di persamaan-persamaan unjuk kerja. Dengan pilihan $2/3$ itu, maka untuk keadaan sinusoid seimbang, nilai puncak i_d dan i_q akan sama dengan nilai puncak arus stator seperti berikut ini. Untuk keadaan seimbang,

$$i_a = I_m \sin \omega_s t \quad (3.26)$$

$$i_b = I_m \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.27)$$

$$i_c = I_m \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.28)$$

Memasukkan (3.26)-(3.28) kedalam persamaan (3.23) memberikan

$$i_d = k_d \left[I_m \sin \omega_s t \cos \theta + I_m \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + I_m \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.29)$$

yang dapat disederhanakan menjadi :

$$i_d = I_m \sin(\omega_s t - \theta) \quad (3.30)$$

Dengan cara yang sama terhadap i_q memberikan :

$$i_q = I_m \cos(\omega_s t - \theta) \quad (3.31)$$

Tentunya jika arus seimbang maka $i_0 = 0$.

Transformasi dari variabel abc ke variabel dq0 dapat dituliskan secara matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Transformasi balik (*inverse*) diberikan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Transformasi diatas juga berlaku untuk fluksi-fluksi lingkup dan tegangan-tegangan stator.

3.3 Gelung fluksi stator dalam komponen dq0

Dengan menggunakan pernyataan-pernyataan untuk ψ_a , ψ_b dan ψ_c seperti diberikan oleh persamaan (3.15)-(3.17), mentrans-formasikan gelung fluksi dan arus ke dalam komponen dq0 kita mendapat pernyataan berikut ini:

$$\psi_d = \left(L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2} L_{aa2} \right) i_d + L_{af} i_f + L_{ak} i_k \quad (3.34)$$

$$\psi_q = \left(L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{3}{2} L_{aa2} \right) i_q + L_{ah} i_h \quad (3.35)$$

$$\psi_0 = (L_{aa0} - 2L_{ab0}) i_0 \quad (3.36)$$

Menetapkan induktansi baru berikut

$$L_d = L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2} L_{aa2} \quad (3.37)$$

$$L_q = L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{3}{2} L_{aa2} \quad (3.38)$$

$$L_0 = L_{aa0} + 2L_{ab0} \quad (3.39)$$

persamaan lingkup fluksi menjadi

$$\psi_d = L_d i_d + L_{af} i_f + L_{ak} i_k \quad (3.40)$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{ah} i_h \quad (3.41)$$

$$\psi_0 = L_0 i_0 \quad (3.42)$$

Terlihat bahwa gelung fluksi stator terhubung pada komponen arus-arus stator dan rotor melalui induktansi yang tetap.

3.4 Gelung fluksi rotor dalam komponen dq0

Dengan mengganti i_a , i_b dan i_c di persamaan (3.20)-(3.21) dengan i_d , i_q diperoleh

$$\psi_f = L_f i_f + L_{fk} i_k - \frac{3}{2} L_{af} i_d \quad (3.43)$$

$$\psi_k = L_{fk} i_f + L_k i_k - \frac{3}{2} L_{ak} i_d \quad (3.44)$$

$$\psi_h = L_h i_h - \frac{3}{2} L_{ah} i_q \quad (3.45)$$

Berulang kembali terlihat bahwa semua induktansi bersifat tetap, yakni terbebas dari letak rotor. Perlu dicatat bahwa arus i_0 tidak muncul di rangkaian rotor. Ini terjadi karena komponen nol dari arus jangkar tidak

menghasilkan ggm bersih melintasi celah udara.

Meskipun induktansi hasil transformasi diatas seperti diperlihatkan (3.43)-(3.45) telah mencapai tujuan utamanya yakni bebas dari sudut rotor namun demi kesederhanaan dan kepraktisan ungkapan-ungkapan induktansi mutual antara hasil fluksi yang menggelum rangkaian medan rotor oleh arus i_d di belitan stator dengan induktansi mutual hasil dari fluksi yang menggelum kumparan stator sumbu-d oleh arus medan berbeda dengan faktor 3/2. Hal ini bisa diseragamkan sehingga mutual bersifat timbal balik dengan pemilihan sistem per unit besaran-besaran rotor. Untuk rincian penurunannya dapat dilihat di [2]. Secara ringkas, untuk mendapat nilai induktansi mutual yang bersifat timbal balik sama hanya perlu menetapkan penentuan daya dasar yang sama untuk semua rangkaian medan dan peredam sebagai berikut :

$$e_{fbase} i_{fbase} = e_{kbase} i_{kbase} = e_{hbase} i_{hbase} \quad (3.46)$$

dan agar induktansi mutual antara rangkaian stator dan rangkaian rotor bersifat timbal balik sama perlu menetapkan dasar daya di rotor sebagai 3/2 kali daya dasar di stator sebagai berikut :

$$e_{fbase} i_{fbase} = e_{kbase} i_{kbase} = e_{hbase} i_{hbase} = \frac{3}{2} e_{sbase} i_{sbase} \quad (3.47)$$

Dengan melakukan hal tersebut diatas maka ungkapan persamaan (3.39) sd (3.44) diatas dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\psi_d = L_d i_d + L_{af} i_f + L_{ak} i_k \quad (3.48)$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{ah} i_h \quad (3.49)$$

$$\psi_0 = L_0 i_0 \quad (3.50)$$

$$\psi_f = L_f i_f + L_{fk} i_k + L_{af} i_d \quad (3.51)$$

$$\psi_k = L_{fk} i_f + L_k i_k + L_{ak} i_d \quad (3.52)$$

$$\psi_h = L_h i_h + L_{ah} i_q \quad (3.53)$$

3.5 Persamaan-persamaan tegangan stator dalam komponen dq0.

Persamaan (3.2) adalah persamaan dasar untuk tegangan fasa dinyatakan sebagai fluksi gelung dan arus fasa. Dengan menerapkan transformasi dq0 dari persamaan (3.32) maka diperolehlah ungkapan tegangan, gelung fluksi dan arus berikut :

$$e_d = p\psi_d - \psi_q p\theta + R_a i_d \quad (3.54)$$

$$e_q = p\psi_q + \psi_d p\theta + R_a i_q \quad (3.55)$$

$$e_0 = p\psi_0 + R_a i_0 \quad (3.56)$$

Huruf θ diatas adalah pernyataan sudut yang dibentuk sumbu fasa a dengan sumbu-d. Dengan demikian maka $p\theta$ itu sama dengan kecepatan putar rotor yakni ω_r .

Dari ungkapan tegangan diatas di luar tegangan jatuh di resistansi terlihat ada dua jenis sumber ggl yakni oleh perubahan gelung fluksi terhadap waktu $p\psi$ dan oleh putaran $\psi p\theta$. Yang terakhir disebut juga ggl putaran(akibat perubahan fluksi diruang) sedang yang pertama disebut ggl transformator(akibat perubahan fluksi dalam waktu).

GGL putaran lebih dominan pada tegangan stator bahkan GGL transformator bernilai nol di keadaan mapan.

4. PERHITUNGAN HUBUNGAN SINGKAT SECARA DINAMIS

4.1 Diskretisasi Persamaan Diferensial[1]

Mengingat fluksi, arus dan tegangan komponen-komponen sistem tenaga listrik seperti generator, saluran dan trafo diatur oleh persamaan diferensial maka untuk mendapatkan tanggapan waktu sistem terhadap gangguan umumnya metodologi penyelesaian yang ada waktu ini adalah dengan pendekatan linier dalam celah waktu yang relatif kecil. Dengan linierisasi sistem persamaan diferensial diubah menjadi persamaan aljabar yang tentunya dengan pertolongan metodologi perhitungan rangkaian listrik nilai arus dan tegangan semua komponen sistem dapat ditentukan di setiap langkah waktu. Berikut ini adalah cara menyatakan induktansi dan kapasitor dua elemen rangkaian listrik sistem tenaga yang mengandung persamaan diferensial dalam simulasi transien.

4.1.1 Induktansi

Persamaan tegangan jatuh dalam sebuah induktor yang dialiri arus adalah sebagai

$$v_k - v_m = L \frac{di_{km}}{dt} \quad (4.1)$$

Pendekatan linier terhadap persamaan diferensial ini dapat diturunkan dengan metoda trapesium berikut ini

$$i_{km}(t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t [v_k(u) - v_m(u)] du \quad (4.2)$$

yang menghasilkan

$$i_{km}(t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{v_k(t) - v_m(t) + v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)\} \quad (4.3)$$

yang selanjutnya disusun kembali menjadi

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} \{v_k(t) - v_m(t)\} + hist_{km}(t - \Delta t) \quad (4.4)$$

dimana

$$hist_{km}(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)\} \quad (4.5)$$

Bagian terakhir yang dinamai hist adalah catatan keadaan pada waktu Δt sebelumnya yang akan dibawa ke waktu sekarang t . Dalam persamaan di atas dapat disimpulkan bagian masa lampau tersebut adalah sebuah sumber arus. Sementara penghubung antara arus dan tegangan jatuh yakni $\frac{\Delta t}{2L}$ dapat dinyatakan sebagai induktansi ekuivalen G_{ekiv} . Rangkaian Norton induktansi dalam hal ini diubah menjadi sebuah rangkaian resistansi atau konduktansi seperti diperlihatkan dalam Gambar 5(a) di bawah ini.

4.1.2 Kapasitor

Untuk kapasitor hubungan arus dan tegangan dapat ditulis sebagai

$$i_{km} = C \frac{d(v_k - v_m)}{dt} \quad (4.6)$$

Hubungan arus dan tegangan dalam bentuk diferensial ini dapat dilinierkan dengan menerapkan pendekatan beda sentral

$$\frac{i_{km}(t) + i_{km}(t - \Delta t)}{2} = C \frac{\{v_k(t) - v_m(t)\} - \{v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)\}}{\Delta t} \quad (4.7)$$

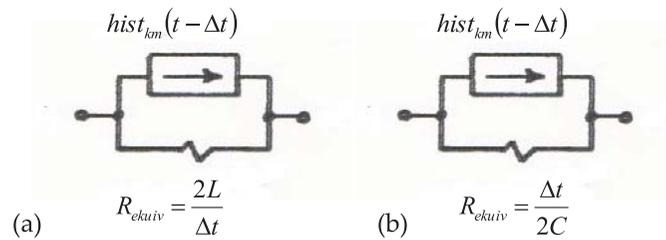
Selanjutnya persamaan di atas dapat disusun sebagai

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \{v_k(t) - v_m(t)\} - i_{km}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} \{v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)\} \quad (4.8)$$

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \{v_k(t) - v_m(t)\} + hist_{km}(t - \Delta t) \quad (4.9)$$

$$hist_{km}(t - \Delta t) = -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} \{v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)\} \quad (4.10)$$

Bentuk persamaan (4.8) dapat digambarkan dalam bentuk rangkaian ekuivalen Norton Gambar 5(b) dengan konduktansi $G_{ekiv} = \frac{2C}{\Delta t}$ dan sumber arus $hist_{km}(t - \Delta t)$.



Gambar 5. Rangkaian resistansi pengganti induktor/kapasitor

Resistansi tentu dalam rangkaian linierisasi tetap sebagai resistansi jadi tidak ada perubahan.

Untuk komponen sistem yang terdiri dari sejumlah induktansi yang saling terkopel seperti dalam kasus generator, trafo, reaktor dan saluran, linierisasi yang sama dapat dilaksanakan secara serentak terhadap semua besaran arus dan tegangan dari induktansi-induktansi yang saling terkopel. Rumusan untuk satu elemen di atas tentu dapat di pakai juga hanya dengan pengertian besaran-besaran yang tadinya skalar berubah menjadi vektor dalam hal arus dan tegangan sedang dalam hal konduktansi dari skalar menjadi matriks seperti berikut :

$$i_{km}^{abc}(t) = \frac{\Delta t}{2L} \{v_k^{abc}(t) - v_m^{abc}(t)\} + hist_{km}^{abc}(t - \Delta t) \quad (4.11)$$

$$i_{km}^{abc} = \begin{pmatrix} i_{km}^a \\ i_{km}^b \\ i_{km}^c \end{pmatrix}, v_k^{abc} = \begin{pmatrix} v_k^a \\ v_k^b \\ v_k^c \end{pmatrix}, v_m^{abc} = \begin{pmatrix} v_m^a \\ v_m^b \\ v_m^c \end{pmatrix}, G_{km}^{abc} = \begin{pmatrix} G_{km}^{aa} & G_{km}^{ab} & G_{km}^{ac} \\ G_{km}^{ab} & G_{km}^{bb} & G_{km}^{bc} \\ G_{km}^{ac} & G_{km}^{bc} & G_{km}^{cc} \end{pmatrix}$$

$$hist_{km}^{abc}(t - \Delta t) = \begin{pmatrix} hist_{km}^a(t - \Delta t) \\ hist_{km}^b(t - \Delta t) \\ hist_{km}^c(t - \Delta t) \end{pmatrix}$$

di mana secara umum $G_{km}^{**} = \frac{\Delta t}{2L_{km}^{**}}$

Dengan menerapkan Hukum Ohm dan Kirchoff maka persamaan persamaan-persamaan individual elemen diatas di satukan dalam satu sistem persamaan dengan kerangka matriks induktansi simpul

$$I_{sim} = G_{sim} V_{sim} \quad (4.12)$$

Penyelesaian persamaan (4.12) di atas paling baik memakai metoda eliminasi Gauss dengan menggunakan teknik matriks jarang memanfaatkan matriks G_{sim} yang renggang atau berelemen tak nol yang jauh lebih sedikit dibanding yang nol. Dengan teknik ini maka soal ukuran raksasa dapat diselesaikan dengan sangat cepat dan membutuhkan tempat di komputer yang sedikit.

Penyelesaian persamaan (4.12) akan menghasilkan tegangan di semua simpul di saat t dan selanjutnya dengan menggunakan hukum Ohm arus di saat t yang mengalir setiap elemen dapat dihitung. Harga-harga di saat t tersebut selanjutnya dipakai untuk menghitung sumber arus untuk dipakai pada langkah waktu berikutnya. Demikian iterasi per langkah waktu dilakukan sampai langkah waktu terakhir.

Dalam pengembangan metoda perhitungan per langkah waktu di atas sebenarnya masih ada beberapa aspek yang memerlukan penjabaran yang lebih rinci seperti bagaimana memperhitungkan parameter terdistribusi yang bergantung frekuensi seperti halnya saluran panjang tegangan

tinggi, parameter yang nonlinier seperti yang terjadi di komponen yang bersandar pada inti besi yang dapat jenuh seperti dalam mesin-mesin berputar atau trafo dan alat-alat penangkal petir yang karakteristik bahan-bahannya yang sengaja dibuat non linier untuk mencapai tujuan tertentu. Termasuk juga bagaimana menyertakan reaksi alat-alat kendali di berbagai komponen.

4.2 Metoda-metoda Perhitungan Hubung Singkat Dinamis.

Proses iterasi per langkah waktu seperti yang diterangkan di atas perlu dirinci lebih lanjut tentang bagaimana memodelkan mesin-mesin berputar sinkron atau tidak sinkron/induksi dan cara menghadapkan persamaan mesin ke dalam persamaan jaringan. Ada dua model yang muncul selama ini dalam merumuskan persamaan mesin yakni model mesin dalam ranah dq0 dan model mesin dalam ranah abc atau fasa.

4.2.1 Model Mesin dalam ranah dq0

Menyatakan mesin dalam ranah dq0 sebagaimana telah ditunjukkan diatas menawarkan parameter mesin yang kontan terhadap waktu sejauh kejenuhan diabaikan. Disamping itu penanganan kejenuhan dengan model ini ternyata lebih sederhana. Masalah di model ini timbul dalam cara menghadapkannya ke persamaan jaringan yang selama ini selalu dinyatakan dalam ranah abc. Ada sejumlah cara diajukan untuk menangani masalah ini di antaranya sebagai berikut ini.

4.2.1.1 Metode Brandwajn[1]

Metoda ini menyatakan mesin sinkron dalam ranah dq0. Masalah timbul pada saat mengintegrasikan mesin sinkron ke persamaan jaringan yang dinyatakan dalam ranah fasa abc. Secara umum jika $L_d \neq L_q$,

transformasi rangkaian dari ranah dq0 ke ranah abc akan menghasilkan parameter-parameter yang berubah dengan sudut rotor. Sehingga konduktansi rangkaian ekuivalen Norton yang akan digabung dengan matriks G_{sim} jaringan akan berubah dari satu iterasi ke iterasi langkah waktu berikutnya. Hal ini akan menyebabkan matriks G_{sim} berubah di setiap iterasi. Konsekuensinya penyelesaian sistem persamaan (4.12) dengan eliminasi Gauss harus selalu mulai dari awal dan ini akan memakan waktu yang banyak. Brandwajn mengajukan cara dengan menyamakan induktansi sumbu-d dan dan sumbu-q seharga rata-rata kedua induktansi tersebut. Perbedaan harga parameter tersebut dikompensasi sebagai sumber arus tambahan. Tentu karena ada bagian tertentu dari sumber arus ini yang adalah fungsi besaran di saat t, maka metoda ini menggunakan tambahan prosedur relaksasi atau prediksi dan koreksi.

4.2.1.2 Metoda Kompensasi Jaringan[9]

Di sini konduktansi mesin sinkron tidak disertakan ke dalam matriks konduktansi jaringan. Prosedur penyelesaian untuk mesin sinkron dilakukan dengan menerapkan teori Thevenin yakni menggantikan jaringan di simpul mesin dengan sebuah ggl dibelakang resistansi ekuivalen. GGL tersebut tidak lain adalah tegangan hasil penyelesaian persamaan sistem jaringan tanpa mesin-mesin. Tentu ggl dan resistansi yang mewakili jaringan harus dikonversi ke sumbu-dq0 agar bisa disatukan dengan besaran-besaran mesin sinkron yang tersimpan dalam sumbu-dq0. Resistansi ekuivalen tersebut adalah resistansi ekuivalen jaringan di lihat dari simpul mesin (driving point resistance). Keburukan metoda ini terletak pada keharusan mesin-mesin harus di pisahkan oleh

saluran berparameter terdistribusi yang jika tidak, terpaksa memakai "stub-line" yang akan memperumit model jaringannya dan menurunkan ketelitian dan membutuhkan langkah waktu yang pendek agar dapat mengakomodasi saluran yang sangat pendek.

Penyelesaian persamaan mesin dengan rangkaian Thevenin jaringan untuk mendapatkan arus injeksi ke jaringan dari mesin. Setelah merubahnya ke ranah abc untuk semua mesin yang ada selanjutnya di pakai untuk menghitung penyelesaian lengkap jaringan dengan prinsip superposisi. Metoda ini diterapkan di ATP untuk menyatakan universal-machine (UM) [1],[9].

4.2.1.3 Metoda Kompensasi Mesin[8]

Kebalikan dari metoda kompensasi jaringan, di sini mesin sinkron yang di reduksi menjadi rangkaian Norton dan selanjutnya disatukan dengan persamaan matriks konduktansi jaringan untuk diselesaikan di setiap langkah waktu. Sumber arus rangkaian Norton di metoda ini di hitung dari tegangan simpul mesin di langkah waktu $t - \Delta t$ atau satu langkah terlambat yang dalam Gambar 6. dinyatakan sebagai $i_m(t)$. Untuk menghindari keadaan terbuka di simpul mesin, sebuah resistansi di pasang paralel dengan sumber arus ini sebesar

$$r'' = \frac{2L''}{N \cdot \Delta t} \quad (4.13)$$

Namun untuk menghilangkan efek shunt ini terhadap jaringan sebuah sumber arus tambahan, $i_c(t)$ diinjeksikan secara paralel untuk mengompensasi arus yang mengalir di shunt tersebut yakni :

$$i_c(t) = \frac{V(t - \Delta t)}{r''} \quad (4.14)$$

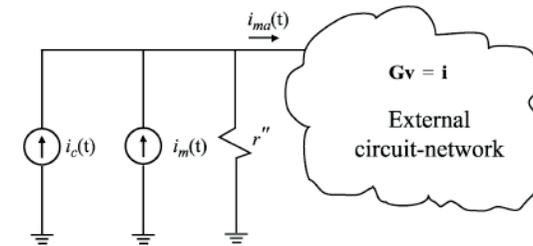
dimana L'' adalah induktansi karakteristik dari mesin tersebut dan N jumlah mesinnya.

Arus bersih yang masuk ke jaringan menjadi :

$$i_{ma}(t) = i_m(t) + \frac{V(t - \Delta t) - V(t)}{r''} \quad (4.15)$$

Karena biasanya kecil maka resistansi karakteristik r'' besar. Untuk Δt yang kecil, $V(t - \Delta t) \approx V(t)$ yang menghasilkan $i_{ma}(t) \approx i_m(t)$. Cara ini diterapkan pada PSCAD/EMTDC[8].

Keuntungan metoda ini terletak pada kesederhanaan pernyataan mesin hanya sebagai sumber arus dan resistansi r'' dan nilainya konstan. Namun keterlambatan yang ada pada sumber arus yang dipakai memaksa langkah waktu harus kecil untuk mendapatkan hasil yang teliti dan stabilitas numerik.



Gambar 6. Mesin diganti dengan sumber arus Norton.

Ketiga metoda di atas memiliki keburukan yang sangat membatasi yakni agar selalu diperoleh stabilitas numerik disyaratkan panjang langkah waktu yang pendek.

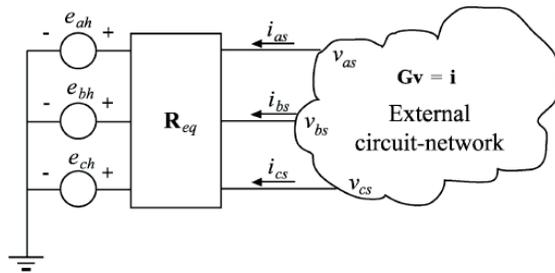
Terakhir ada usaha untuk memperbaiki kelemahan ketiga metoda

diatas yakni memodelkan mesin sinkron sebagai sebuah ggl di belakang sebuah reaktansi.

4.2.2 Model Mesin dalam ranah abc

Untuk memperbaiki ketelitian simulasi dan stabilitas numerik dikenal dua model : *coupled phase domain*(PD) models yang lebih dahulu diajukan [5] dan *voltage-behind-reactance*(VBR) models yang lebih baru [6].

Model mesin di ranah fasa ini tentunya mengurangi proses untuk transformasi bolak-balik antara ranah fasa dan ranah dq0 dalam kasus metoda sebelumnya. Baik mesin maupun jaringan sudah sama-sama di ranah fasa dengan demikian integrasinya bersifat langsung. Tentunya mesin diperhadapkan dengan jaringan dalam rangkaian ekuivalen Theveninnya. Salah satu contoh mesin yang titik bintangnya ditanahkan diperlihatkan dalam Gambar 7, sebuah mesin yang diperhadapkan dengan jaringan



Gambar 7. Rangkaian ekuivalen Thevenin dalam fasa

Dengan penggabungan mesin dan jaringan seperti ini penyelesaian persamaan keduanya terlaksana secara serentak, artinya tidak perlu

prediksi dan koreksi seperti metoda-metoda sebelumnya. Hal ini akan sangat memperbaiki ketelitian dan stabilitas numerik.

Persamaan penghadapan mesin ke jaringan secara generik dapat dituliskan untuk ranah fasa ini sebagai :

$$v_{abc}(t) = R_{abc}^{eq}(t)i_{abc}(t) + hist_{abc}(t - \Delta t) \quad (4.16)$$

dengan $R_{abc}^{eq}(t)$ adalah matriks resistansi ekuivalen dan $hist_{abc}(t - \Delta t)$ adalah sumber tegangan yang menyimpan informasi dari langkah waktu sebelumnya. Persamaan ini diperoleh hasil diskretisasi persamaan tegangan mesin yang setelah dikalikan dengan matriks konduktansi, inversi matriks resistansi, yakni $G_{abc}^{eq}(t) = [R_{abc}^{eq}(t)]^{-1}$ diperoleh persamaan arus yang langsung dapat digabungkan dengan persamaan jaringan. Meskipun sama dalam bentuk persamaan penghadapannya model PD dan VBR memiliki perbedaan yang berarti dalam sifat numeriknya dan jumlah perhitungannya.

4.2.2.1 Model PD.

Persamaan tegangan di mesin sinkron dalam model PD adalah sebagai berikut :

$$\begin{pmatrix} v_{abcs} \\ v_{pqrs} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i_{abcs} \\ i_{pqrs} \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} \psi_{abcs} \\ \psi_{pqrs} \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

dan persamaan gelung fluksi dinyatakan sebagai

$$\begin{pmatrix} \psi_{abcs} \\ \psi_{pqrs} \end{pmatrix} = L(\theta_r) \begin{pmatrix} i_{abcs} \\ i_{pqrs} \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Di persamaan terakhir induktansi diri maupun bersama yang ada di matriks $L(\theta_r)$ berubah sebagai fungsi dari posisi rotor θ_r .

Persamaan kopel elektromagnet ditulis sebagai fungsi besaran-besaran mesin adalah:

$$T_e = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} i_{abc} \\ i_{pqr} \end{pmatrix}^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} L(\theta_r) \begin{pmatrix} i_{abc} \\ i_{pqr} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Jadi dalam metoda PD ini persamaan (4.17) dan (4.18) di diskritisasi untuk menghasilkan persamaan (4.16) diatas. Di pelaksanaannya mengevaluasi matriks $R_{abc}^{eq}(t)$ dan $hist_{abc}(t - \Delta t)$ sangat banyak membutuhkan perhitungan untuk membentuknya dan harus dilakukan di setiap langkah waktu. Metoda ini dapat memiliki ketelitian yang kurang karena akar karakteristik matriks di metoda ini dapat jauh keluar dari lingkaran berjari-jari satuan.

4.2.2.2 Model VBR[6]

Meski menyatakan stator sama-sama dalam ranah fasa ada perbedaan kunci dalam penanganan struktur medan dalam model *voltage-behind reactance* di banding dengan model PD. Di metoda PD struktur medan di nyatakan secara eksplisit seperti pada persamaan (4.17). Sementara di model VBR struktur medan di reduksi dan disertakan secara implisit di persamaan stator seperti berikut:

$$v_{abc} = R_s i_{abc} + p[L_{abc}''(\theta_r) i_{abc}] + v_{abc}'' \quad (4.20)$$

Makna tegangan dibelakang v_{abc}'' reaktansi beserta induktansi L_{abc}'' dapat dilihat di [6].

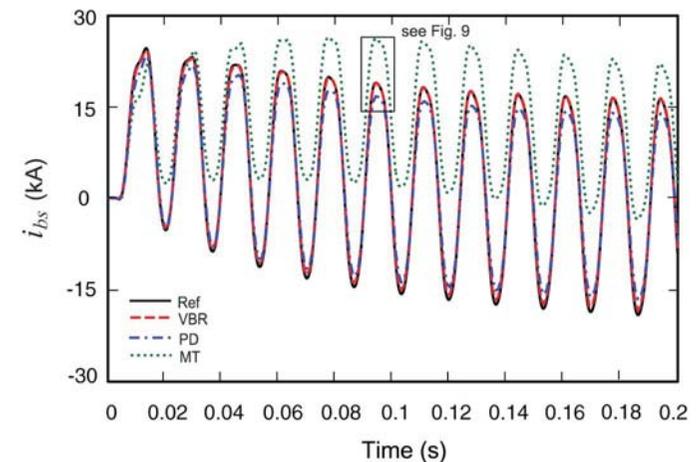
Persamaan untuk kecepatan rotor dan posisinya sama dengan (3.1) dan (3.2). Namun persamaan untuk kopel elektromagnet

$$T_e = \frac{2P}{4} (\psi_{md} i_{qs} - \psi_{mq} i_{ds}) \quad (4.21)$$

Sebenarnya prosedur penyelesaian model PD dan model VBR pada tahap penggabungan persamaan mesin (4.16) ke persamaan jaringan sama persis. Perbedaannya hanya dalam jumlah perhitungan R_{eq}^{vbr} dan $hist_h^{vbr}$ yang hanya separuh dari koefisien yang sama untuk model PD. Kelebihan lain, matriks yang dihasilkan model VBR memiliki akar karakteristik yang lebih baik keadaannya sehingga dapat memperbaiki ketelitian numerik.

4.2.3 Perbandingan hasil simulasi.

Gambar 8 di bawah ini adalah hasil simulasi dengan berbagai perangkat lunak yang populer saat ini seperti MicroTran (MT), ATP, PSCAD, EMTP-RV maupun PD dan VBR. Yang di simulasi adalah mesin sinkron yang pada $t = 0$ di hubung singkat secara tiga fasa simetris. Tegangan medan v_f di pegang tetap. Kopel $T_m = 0.0$. Kondisi mesin berawal dari keadaan tak berbeban yang mantap. Langkah waktu $\Delta t = 1$ ms.



Gambar 8. Arus stator i_{bs} untuk langkah waktu 1 ms.

Untuk langkah waktu selebar 1 ms semua metoda yang berdasar pada metoda relaksasi seperti prediksi-koreksi, kompensasi jaringan dan kompensasi mesin hasilnya rusak dan jauh dari referensi. Semua metoda memberi hasil yang hampir sama untuk langkah waktu 50 us.

Jadi pilihan metoda yang ada saat ini adalah :

- **Model ranah fasa** : jumlah perhitungan lebih banyak per iterasi namun langkah waktu dapat lebih panjang dengan ketelitian yang terjaga.
- **Model ranah dq0** : jumlah perhitungan lebih sedikit per iterasi tapi memerlukan langkah waktu yang pendek untuk menjamin ketelitian.

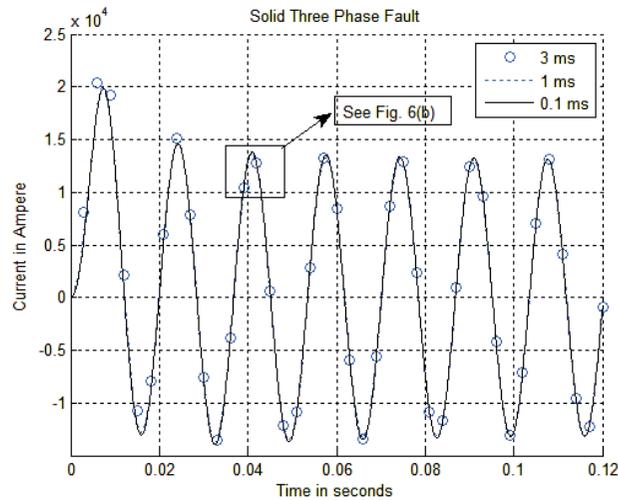
4.3 Prospek di Masa Datang

Dalam beberapa waktu terakhir ini penulis bersama rekan-rekan sedang mengembangkan metoda perhitungan arus hubung singkat dinamis yang baru. Metoda ini dimaksudkan untuk mengeliminasi semua kelemahan dari metoda-metoda yang ada sekarang. Diharapkan metoda baru ini akan menghasilkan hasil dengan ketelitian yang tinggi dan dapat diperoleh dengan jumlah perhitungan yang jauh lebih sedikit. Metoda ini boleh dikatakan “merevolusi” metodologi yang ada bahkan sampai ke tingkat yang tak terbayangkan sebelumnya.

Gagasannya adalah membalik apa yang dilakukan selama ini yakni menyatakan jaringan di ranah dq0 sebagai ganti ranah fasa yang dipakai selama ini. Dengan menyatakan jaringan di ranah dq0 maka integrasi mesin yang di ranah dq0 ke jaringan menjadi langsung. Akibatnya sangat dahsyat :

1. Persamaan mesin dan jaringan di ranah dq0 koefisien-koefisiennya semua konstan, sejauh kejenuhan diabaikan, sehingga persamaan hasil diskretisasi akan berbentuk resistansi yang tidak berubah dengan waktu. Dengan demikian matriks konduktansi simpul Gsim gabungan mesin dan jaringan pun akan konstan sepanjang tidak ada perubahan struktural di jaringan atau di mesin.
2. Akibatnya : penyelesaian persamaan (90) di setiap langkah waktu menjadi sangat cepat karena hanya membutuhkan proses pergantian maju dan mundur saja karena penguraian matriks Gsim cukup dilakukan sekali yakni sebelum masuk ke iterasi langkah waktu.
3. Dalam ranah dq0 jika jaringan juga seimbang rangkaian-rangkaian sumbu-d, -q dan -0 gabungan mesin dan jaringan terpisah satu dari yang lainnya. Sehingga sistem persamaan rangkaian di sumbu-sumbu tersebut di bentuk dan di selesaikan secara terpisah. Keadaan ini menawarkan dua akibat sangat penting :
4. Proses penyelesaian persamaan mesin dan jaringan bersifat serentak dan langsung sehingga ketelitian terjamin dan menghilangkan sama sekali masalah stabilitas numerik.
5. Ringkas dalam penyimpanan karena sebagai ganti menyimpan 9 elemen matriks untuk setiap saluran dalam metoda ranah fasa cukup menyimpan 3 elemen di ranah dq0.

Penerapan gagasan ini sudah dipublikasikan pada [13] yang hasilnya sangat menjanjikan. Hasil metoda baru nyaris tak ada bedanya dengan ATP untuk langkah waktu yang kecil misal 0.01 ms.



Gambar 9. Hasil simulasi metode baru dengan berbagai langkah waktu yang berbeda.

ATP yang menggunakan metoda Brandwajn gagal bila $\Delta t \geq 1ms$. Seperti terlihat di Gambar 9 tidak ada batas untuk langkah waktu bagi metode yang diusulkan. Kalaupun ada hanya batas Nyquist untuk memberi rincian mengikuti gelombang frekuensi utama.

Tentu, ke depan masih ada yang perlu dikembangkan pada metode ini di antaranya :

1. Menyertakan sifat tidak linier komponen-komponen sistem.
2. Ketidakseimbangan di saluran.
3. Menyertakan peralatan kendali.
4. Menyertakan persamaan mekanik.
5. Penyelesaian persamaan dalam keadaan gangguan sudah hilang.

Catatan : jika gangguan hilang yang di ikuti kenaikan tegangan di

jaringan maka beban akan kembali menarik daya dari sistem dengan demikian beban perlu di sertakan dalam simulasi.

Jika butir-butir pengembangan di atas dapat di akomodasi dengan cara yang tidak banyak mengorbankan efisiensi metoda dasar, besar harapan metoda ini akan dapat menjadi standar industri internasional yang baru.

Bahkan pengembangan metode baru ini untuk simulasi stabilitas sangat dimungkinkan untuk menghasilkan algoritma yang efisien.

Pengembangan ke depan juga dimungkinkan untuk menghitung arus hubung singkat secara tertutup. Publikasi penulis di [14] yang menyajikan penyelesaian simulasi hubung singkat untuk satu mesin membuka pintu pengembangan ke sistem mesin-jamak. Hipotesa yang dapat diajukan pada saat ini bahwa sistem tenaga listrik yang sedang tertekan karena gangguan hubung-singkat dengan anggapan beban nol maka setiap mesin melihat sistem luarnya sebagai jaringan linier yang dapat direduksi menjadi menjadi satu impedansi saja yakni impedansi Thevenin. Dengan demikian setiap mesin yang terhubung hanya ke impedansi Theveninnya itu dapat diselesaikan secara terpisah dan tertutup. Gagasan ini menawarkan cara yang sangat efisien untuk menentukan arus hubung singkat di saat tertentu secara langsung atau "snap-shot" tanpa simulasi langkah waktu demi langkah waktu dari awal. Metoda ini memiliki peluang menjadi standar industri internasional menggantikan standar IEEE atau IEC yang berlaku sekarang yang berdasar pada metode statis atau impedansi tetap.

5. PENUTUP

Perhitungan hubung singkat sebagai salah satu pekerjaan rutin dalam pengelolaan sistem tenaga sangat menentukan dalam menciptakan sistem tenaga listrik yang andal. Teknik modelisasi semua dalam dq0 (*the all-dq0 modelisation*) gagasan yang memberi harapan dalam simulasi hubung singkat dinamis yang efisien dan teliti. Sifat ini diturunkan dari model yang sederhana namun paripurna yang menghilangkan masalah stabilitas numerik. Besar harapan teknik ini akan menjadi standar internasional di masa depan. Pekerjaan untuk menyempurnakan metodologi ini sedang menanti yang akan kami buat menjadi bahan tesis dan disertasi para mahasiswa ke hari-hari yang akan datang. Harapan ini bila terwujud akan menjadi sumbangsih besar bagi teknik tenaga listrik di dunia.

Secara langsung tentu teknik ini akan dapat membantu pekerjaan-pekerjaan yang berkaitan dengan perencanaan, operasi dan pemeliharaan sistem tenaga di Indonesia. Lebih dari itu, jika harapan-harapan di atas terwujud, akan memperkuat postur Indonesia di dunia ilmu internasional.

Walaupun mungkin publikasi di tempat lain sama bermutu bahkan lebih namun sejauh ini kepercayaan masyarakat terhadap jurnal IEEE masih sangat tinggi mengingat ketatnya mereka menjaga mutu terbitannya. Publikasi di jurnal IEEE oleh banyak pihak dipakai sebagai barometer kemajuan ilmu di satu negara.

Satu nasihat penulis untuk para pengambil putusan di tingkat tertinggi negara kita pakailah jumlah terbitan anak bangsa di jurnal-jurnal bergengsi dunia untuk mengukur kemampuan bangsa untuk memulai

apapun yang bersifat teknologi tinggi. Hasil survey penulis di jurnal IEEE menggambarkan perjalanan jumlah paper yang muncul dari Cina seperti di bawah ini. Majalah yang penulis periksa kebetulan yang ada dalam koleksi penulis yakni IEEE Transactions on Power System dan IEEE Transactions on Power Delivery. Secara acak penulis ambil tahun 1997 dan 2014. Untuk tahun 1997 baru bilangan jari paper yang dihasilkan para penulis Cina, sebagian malah hanya karena ikut guru besar mereka di AS atau Eropa. Namun di tahun 2014 penulis menemukan keadaan luar biasa di kedua jurnal tersebut masing-masing jumlahnya mencapai 33% dan 21%. Perlu dirinci lagi bahwa sebagian besar penelitian mereka dilakukan oleh mereka dan di biayai dari dalam negeri.

Dari angka-angka ini jelas terlihat korelasi jumlah terbitan dengan kemampuan ekspansi industri mereka yang bisa kita rasakan mulai tahun 2000an.

Terbitan-terbitan anak bangsa di samping menjadi tolok ukur kemajuan bangsa juga secara tidak langsung iklan positif bagi produk-produk industri bangsa kalau arah ekspansi industri model Cina, India dan Korea yang kita pilih. Hasil renungan penulis bahkan itu baru syarat perlu. Di luar itu masih ada syarat tambahan seperti politik luar negeri dan budaya. Bagaimana kita mengeksport barang kita kalau kita mengambil gaya Korea Utara dalam diplomasi ?. Bagaimana kita merebut ilmu dan teknologi kalau kita tidak bisa “masuk” ke bangsa-bangsa lain yang kebetulan waktu ini lebih maju.

Proses merebut ilmu dan teknologi bersifat mahal dan perlu daya tahan tinggi. Cina memerlukan lebih kurang 25 tahun kalau pengiriman orang-orang mereka ke AS dan Eropa sejak akhir perang Vietnam 1975

dipakai sebagai awal. Sebenarnya, meski di bawah tirai bambu ilmu dan teknologi Cina tidak buruk sekali tapi hanya cukup untuk *survival* saja. Persinggungan penulis dengan calon-calon peneliti Cina terjadi di awal 1980an. Praktis keilmuan mereka masih mengandalkan perhitungan manual. Ceritanya hanya ada beberapa gelintir komputer di seluruh Cina waktu itu. Kalau kita memakai tahapan masuknya sepeda motor Cina sebagai titik awal ekspansi industri mereka, yang terjadi di awal tahun 2000an maka tepatlah 25 tahun diperlukan untuk menyerap dan memimpin di kemajuan ilmu dan teknologi.

Bagaimana dengan Indonesia ? Apakah jalan terjal dan sulit itu siap kita arungi ? Apakah ada pilihan lain ?

Dengan mengandalkan keunggulan lokal kita sebenarnya Indonesia tidak perlu harus masuk ke kompetisi hidup-mati di ilmu dan teknologi. Kita kembangkan saja apa yang sudah dimiliki. Teknologi yang dikembangkan cukup yang menyangkut peningkatan nilai tambah hasil pertanian, kelautan dan tambang dan tentu teknologi yang mendukungnya. Mari kita definisikan skala prioritas untuk itu sehingga penganggarannya akan lebih efektif. Penulis mengamati kita belum satu kata dalam pilihan jalur mana yang akan dipilih. Kasus lompatan teknologi yang diluncurkan DR Habibie di masa lalu belum pernah diaudit apakah berhasil atau tidak. Ekonom kita juga seperti masih trauma dengan proyek teknologi tinggi. Bisa dimengerti karena industrialisasi perlu pasar untuk menghidupinya. Pasar di sini harus meliputi dunia dan itu memerlukan keunggulan tertinggi dan itu harus dari kreasi bangsa sendiri. Tidak ada jalan mudah dan cepat menuju ke sana.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terlebih dahulu penulis ingin menyampaikan penghargaan dan terima kasihnya pada Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB atas kehormatan yang diberikan untuk menyampaikan Orasi Ilmiah ini di hadapan hadirin secara khusus dan masyarakat Indonesia secara umum.

Selanjutnya hutang budi penulis yang tak terbalaskan penulis haturkan kepada semua guru penulis, yang sebagian sudah almarhum, dari mulai SR, SMP, SMA dan PT, yang karena usaha mereka memberi tuntunan dan ilmu kepada penulis, menjadikan penulis sebagaimana ada sekarang.

Terima kasih yang tulus juga penulis sampaikan kepada para kolega penulis yang mendukung pengangkatan penulis jadi guru besar di antaranya : Bapak Prof John S Sapie dengan surat rekomendasi yang sangat menyanjung, Prof Ngapuli Sinisuka, Prof Yanuarsyah Haroen, Prof Komang Bagiasma, Prof Indro Nurhadi, Prof Bernhard Sitohang terlebih-lebih Prof Suwarno sebagai Dekan Sekolah Teknik Elektro dan Informatika.

Terima kasih dan penghormatan setinggi-tingginya saya haturkan pada kedua orangtua saya almarhun Hofjardes Oloan Sianipar dan almarhumah Bertanaida Sibarani yang yang tak pernah berhenti mendukung dan menyemangati penulis untuk menjadi pecinta ilmu pengetahuan. Juga pada kakek dan nenek penulis almarum St. Sopar Sapmaurung Sianipar dan almarhumah Paulina Siahaan yang telah membesarkan dan mendidik penulis dimasa balita sampai kelas 2 SR.

Tentu terakhir sekali terima kasih yang sebesar-besarnya penulis

haturkan kepada keluarga penulis yang tercinta, istri penulis Yetti Mei Djuluan Nainggolan yang dengan kesabaran mengikuti jalan hidup penulis yang prihatin dan putra-putri penulis Jon Manalasa dan Paulina Uli Tarabunga yang selalu dengar nasihat orang tua.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. H. Dommel, EMTP Theory Book, Vancouver, BC, Canada: MicroTran, Power System Analysis Corporation, 1992
2. P. Kundur, Power Stability and Control, McGraw Hill, Inc. 1994.
3. N. Tleis, Power System Modelling and Fault Analysis, Theory and Practice, Elsevier, 2008.
4. A Berizzi, S Massucco, A Silvestri and D Zaninell, Short-Circuit Current Calculation: A Comparison between Methods of IEC and ANSI Standards Using Dynamic Simulation as Reference, IEEE Trans on Industry Applications, VOL. 30, NO. 4, JULY / AUGUST 1994.
5. J.R Marti, K.W. Louie, A phase-domain synchronous generator model including saturation effects, IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 1, pp. 222–229, Feb. 1997.
6. L. Wang and J. Jatskevich, “A voltage-behind-reactance synchronous machine model for the EMTP-type solution,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 4, pp. 1539–1549, Nov. 2006.
7. H. W. Dommel, “Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399, Apr. 1969.
8. A.M. Gole, R.W. Menzies, H.M. Turanli, and D.A. Woodford, Improved Interfacing of Electrical Machine Models to Electromagnetic Transients Programs, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, September 1984.
9. H.K. Lauw, W.S. Meyer, Universal Machine Modeling for the Representation of Rotating Electric Machinery in an Electromagnetic Transients Program, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6 June 1982.
10. G.H.M Sianipar, Some Local Criteria of The Optimal Node-Elimination on Graph, Jurnal IECT, vol. 2, no.1, 2000.
11. G.H.M Sianipar, Robust Fast Decoupled Loadflow via axis rotation, MITE-ITB, vol 7, no. 2, Agustus 2001.
12. G.H.M. Sianipar, D. Barus, M. Nurdin, Selective Eigenvalue Computation for Small Signal Stability Analysis of Large Power System, MITE-ITB, vol.9, no.2, 20003.
13. G.H.M Sianipar, The All-DQ0-EMTP, ITBJ. Eng. Sci, vol. 43, no. 1, 2011.
14. G.H.M Sianipar, Closed Form Solution of Synchronous Machine Short Circuit Transients, ITB 2010.
15. G.H.M Sianipar, Perencanaan Jaringan Listrik Nusantara, Proceeding Seminar Teknik Tenaga Listrik, ITB-Medco, Bandung 2010.
16. G.H.M Sianipar, Superposition-based Fault Analysis—The Exact Maximum Asymmetric Current, Proceeding Seminar JICA, Bangkok 2010.
17. G. H. M. Sianipar, *Calculation of electromagnetic transient in cables*, Disertasi, ECL Lyon 1984.

CURRICULUM VITAE



Nama : **GIBSON HILMAN
MARUHUM SIANIPAR**
Tmpt. & tgl. lhr. : Siantar 29 Juni 1948
Pekerjaan : Pengajar Sekolah Teknik Elektro
dan Informatika,
Jl. Ganesa 10. Bandung 40132.

Nama Isteri : Yetti Mei Djuluan Nainggolan
Nama Anak : - Jon Manalasa Sianipar
- Paulina Uli Tarabunga Sianipar

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Sarjana Teknik Elektro, ITB, Bandung, 1973
- Diplome Etudie d'Approfondie, Ecole Centrale de Lyon, France, 1981.
- Doktor Teknik Elektro, Ecole Centrale de Lyon, France, 1984.

II. RIWAYAT PENUGASAN DI ITB :

- Kepala Laboratorium Sistem Tenaga, 1995-2004.
- Anggota Majelis Jurusan Teknik Elektro, 1999-2003.
- Ketua KPPS STEI dan anggota KSPS ITB, 2015 sampai sekarang.
- Anggota Pengawas Pemilu Indonesia 1999.

III. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL STEI-ITB

- Guru Besar 2014
- Lektor Kepala 2001
- Lektor 1997
- Lektor Muda 1981
- Asisten Ahli 1977

IV. PENGAJARAN

- Operasi dan Kendali Sistem Tenaga, S2
- Komputasi di Sistem Tenaga, S2
- Penerapan Optimalisasi di Sistem tenaga, S2
- Analisis Numerik untuk Sistem Tenaga, S1
- Rangkaian Listrik, S1.

V. RIWAYAT DALAM ORGANISASI PROFESI.

- Anggota IEEE, 1995 sampai sekarang
- Pengurus IATKI 2012 sampai sekarang
- Kepala Lembaga Sertifikasi Kompetensi IATKI, 2005 -2015.
- Anggota Perumus KKNI bersama Departemen Tenaga Kerja, 2006-2012.

