

Digital Simulation of Saturated Electro-mechanical Energy Converters.

by: M. RIDZUAN SALLEH, Ph.D. (London), C. Eng.,
MIEE, Mem. IEEE, P. Eng., MIEM

ABSTRACT

Based on the now familiar Bond Graph analysis the process of electro-mechanical energy conversion in electrical machines is studied in detail. The paper avoids the use of transformation matrices and relies on the diagrammatic representations which evolve from the bond graph method to extract the necessary mathematical equations for subsequent digital simulation.

LIST OF PRINCIPAL SYMBOLS:

- e — effort, emf
- i — flow, current
- λ — momentum, time integral of effort, flux linkage
- q — displacement, time integral of flow, charge
- E — energy, steady-state phase emf
- K — gyrator modulus matrix
- T — steady-state shaft torque
- R — resistance
- τ — torque

SUBSCRIPTS

- m — magnetizing
- l — leakage
- a — phase 'a'
- b — phase 'b'
- c — phase 'c'
- F — field

Dr. Ridzuan Salleh is an Associate Professor in Electrical Engineering at Universiti Teknologi Malaysia, Gurney Road, Kuala Lumpur, Malaysia.

Selakunan Digital untuk Penukar-Penukar Tenaga Letromekanik yang Tepu

Oleh: M. RIDZUAN SALLEH, Ph.D.(London), C.Eng.,
MIEE, P.Eng., MIEM, Mem.IEEE.

ABSTREK

Berdasarkan kepada penguraian Geraf Bond yang sekarang ini selalu digunakan, proses penukaran tenaga letromekanik di dalam mesin letrik akan dikaji dengan mendalam. Kertas ini akan mengelakkan kegunaan matrik-matrik pengubahan dan oleh kerana itu akan menumpukan kepada kegunaan gambaran rajah yang berhasil daripada cara Geraf Bond ini, darimana persamaan-persamaan hisab untuk selakunan digital akan dapat diwujudkan.

SENARAI SIMBOL-SIMBOL YANG PENTING

- e — daya guna, emf
- i — aliran, arus
- λ — momentam, pengkamil waktu untuk daya guna, perangkaian uratdaya
- q — anjakan, pengkamil waktu untuk aliran, cas
- E — tenaga, emf fasa yang tetap
- K — matrix modula kisar
- T — kilas aci untuk keadaan tetap
- R — rintangan
- τ — kilas

SUBSKRIP:

- m — pemagnetan
- l — bocor
- a — fasa 'a'
- b — fasa 'b'
- c — fasa 'c'
- F — medan

- D — direct axis damper
- Q — quadrature axis damper
- s — stator
- r — rotor

INTRODUCTION

Bond graphs^{1,2} have been introduced in dynamical system analysis to provide a uniform technique for the description of a wide variety of physical systems involving mixed physical domains. The graphs are based on power and energy flow and, hence, lead to problems being formulated in terms of power and energy variables. Attention is focussed not on the mathematical equations but, via their physics, on the structures of the system involved. The bond graphs are then described in an appropriate manner to the computer for the generation of equations and their solutions³.

The development of electrical machine theory, on the other hand, although concerned with dynamical systems involving mixed physical domains and depending on incompletely analysed underlying electromagnetic field phenomena, rested mainly on electrical circuit theory, the form of which has changed with time. Initially computing constraints gave rise to the classical rotating field theory followed by the application of transformation theories of Parks and others which produce, for example, the d-q-o system of co-ordinates in common use today. The generalization of this analysis by Kron using tensor transformations linked the equations of one machine to those of another of different type, and this approach, when reintegrated, has led to the generalised or unified machine theory taught today^{3,4} with the focus of interest on performance rather than design.

Although these comprehensive treatments of machine theory are characterised by few basic principles, these principles are imbedded in the fundamental modelling dictated by the computing constraints, namely the use of equivalent circuit theory and transformations, and a method of solution which leads to the description of the machines in terms of differential equations. With the differential equation parameters appropriate to the frame of reference, starting conditions followed with the problems of numerical analysis dismissed to the computer solution.

It is evident, however, that the computational considerations which promoted existing patterns of machine theory are substantially different today. It is also of interest to note the modelling principle that the models summarising the machine relationships are generally considered to be in their final and, in some sense, absolute form at the stage prior to computer solution. In the inevitable attempts to develop machines and, consequently, machine theory are these constraints and principles therefore to remain inviolate?

This paper investigates these questions using the bond graph approach which enables the magnetic and electric domains to be bridged in a unified manner and from which equations can be automatically generated to evolve working models of machines and other devices⁵. The bond graph notations and basic elements for

- D — pelembab paksi terus
- Q — pelembab paksi segi
- s — setator
- r — rotor

PENDAHULUAN

Geraf bond^{1,2} telahpun diperkenalkan di dalam penguraian sistem dinamik untuk mewujudkan satu cara seragam untuk menerangkan beberapa bentuk sistem jasad yang mempunyai domen fizikal bercampuraduk. Geraf ini berasaskan kepada aliran kuasa dan tenaga dan oleh itu mengakibatkan masalah-masalah dibangkitkan di dalam ertikata angkubah-angkubah kuasa dan tenaga. Perhatian juga ditumpukan kepada persamaan-persamaan hisab, dan melalui jasadnya, kepada struktur-struktur sistem tersebut. Geraf bond ini akan dikumpulkan dan diterjemahkan sesuai dengan kegunaan komputer untuk mengeluarkan persamaan-persamaan dan selepas itu mewujudkan penyelesaian-penyelesaian tertentu.

Perkembangan tiori mesin elektrik, sungguhpun sebaliknya terkait dengan sistem dinamik yang mempunyai domen fizikal bercampuraduk dengan menggunakan fenomena-fenomena medan letromagnet yang tiada lengkap, telah tertakluk kepada tiori litar elektrik yang bentuknya bertukar corak mengikut masa. Dari mulanya sekatan-sekatan dalam kegunaan komputer telah mendorong kepada kegunaan tiori-tiori pengubahan yang dihasilkan oleh Parks dan lain-lain untuk mewujudkan, contohnya, sistem kodinet d-q-o yang kerap digunakan pada masa ini. Kesimpulan penguraian ini oleh Kron dengan menggunakan pengubahan-pengubahan Tensor telah menyatukan persamaan satu mesin kepada mesin yang lain dan cara ini apabila dicantum akan mewujudkan satu tiori mesin umum yang digunakan sekarang.^{3,4} Ini menghasilkan satu pandangan tertumpu kepada kelakunan dan bukan rekabentuk.

Sungguhpun kajian lengkap tiori mesin ini hanya mengandungi sebilangan kecil daripada prinsip-prinsip asas, tetapi, prinsip-prinsip ini telah disatukan di dalam model-model asas tertakluk kepada sekatan-sekatan komputer, seperti kegunaan tiori litar samanilai dan pengubahan-pengubahan, dan cara-cara penyelesaian yang menerangkan mesin-mesin ini di dalam ertikata persamaan-persamaan kerbeadaan. Dengan menggunakan parameter-parameter persamaan kerbeadaan yang terkait dengan rangka rujukan, keadaan permulaan akan timbul dengan masalah-masalah penguraian nilai-nilai diserahkan kepada komputer untuk penyelesaian.

Dengan menggunakan komputer untuk mengubah suai tiori mesin, pertimbangan baru telah wujud pada masa ini. Juga prinsip-prinsip yang digunakan untuk menghasilkan model-model tersebut telah meringkaskan perkaitan parameter mesin elektrik yang lengkap dan mutlak sebelum diuraikan oleh komputer. Adakah dalam usaha membentuk mesin dan tiori mesin ini sekatan-sekatan dan prinsip-prinsip berkaitan dengannya sentiasa tidak berubah?

Kertas ini akan menyoalkan masalah-masalah tersebut di atas dengan menggunakan cara geraf bond. Ini akan menunjukkan perhubungan di antara domen-domen magnet dan elektrik secara automatik untuk mewujudkan model-model mesin dan alat-alat lain.⁵ Tandanama-tandanama geraf bond dan elemen-elemen

electromechanical energy conversion were reviewed in a previous paper⁵ and extended in section 2 with descriptions of two new necessary elements arising in this study, the inductance and capacitance mutators. The method is then applied to the analysis of a synchronous machine under steady state conditions followed by the dynamical bond graph of polyphase synchronous machine in section 4. Although computing constraints still limit multimachine studies to use the theories of transformation, e.g. d-q-o models. phase co-ordinate models have been developed for use in small system analysis by several organizations. Following this trend the bond graph models of these machines in sections 3 and 4 are presented in terms of phase co-ordinates. Finally bond graph models are then translated directly by the computer into appropriate differential and algebraic equation form and solved. Section 5 considers briefly some of the forms of solution that can be used and treats the incorporation of non-linear functions such as saturation effects prior to illustration of the results of some analysis in section 6.

BOND GRAPH NOTATIONS

In this paper system models are constructed using a uniform notation for all types of physical systems involving various energy domains. It has been shown^{1,2,5} that models based on apparently diverse branches of engineering science can all be expressed using the notation of bond graphs and the associated techniques. Based on this language, the nature of the parts of the model and the manner in which these parts interact can be made evident in a graphical format. As such analogies between various types of systems can be displayed and experience in one field can be extended to another.

Bond graph models of electrical, mechanical, hydraulic, pneumatic, thermal and other systems can be constructed from a rather small set of ideal elements. Using standard techniques¹, the models may be translated into differential equations or computer simulation schemes.

Necessary Additional Bond Graph Elements for Electromechanical Energy Conversions

In electromechanical energy conversion the interaction of the mechanical and electrical energies occurs in an intermediate medium, namely the magnetic energy domain. The usual bond graph elements^{1,2} are defined by the effort and flow which are shown explicitly on either sides of the bond. The displacement and momentum quantities are both implied. Consequently a bond graph notation which explicitly displays the energy variables particularly the basic magnetic field pro-

asas untuk penukaran tenaga letromakenik telahpun diterangkan di dalam kertas kerja yang berasingan⁵, dan untuk seksi 2 dalam kertas ini dua elemen-elemen baru yang perlu digunakan di dalam kajian ini akan dikemukakan. Elemen-elemen ini telah dinamakan sebagai Mutator Arohan dan Mutator Kapasitan. Cara ini telahpun digunakan di dalam penguraian mesin letrik segerak di dalam keadaan tetap. Ini diikuti oleh satu kajian mesin letrik segerak multifasa dan akan diterangkan di dalam seksi 4. Sungguhpun sekatan-sekatan kegunaan komputer telah menaklukkan kajian multi mesin kepada kegunaan tiori-tiori perubahan, contohnya model-model d-q-o, tetapi model-model fasa kodinet telah juga berjaya digunakan di dalam penguraian-penguraian sistem kecil oleh beberapa pertubuhan. Mengikut jejak ini model-model graf bond untuk mesin-mesin di seksi 3 dan 4 telahpun dipersembahkan di dalam istilah koodinet-koodinet fasa. Akhirnya model-model graf bond ini akan diterjemahkan secara terus kepada komputer untuk menghasilkan persamaan-persamaan kerbedaan dan aljebra supaya dapat diuraikan. Seksi 5 menunjukkan rupabentuk-rupabentuk keputusan penguraian ini dan juga menerangkan bagaimana fungsi-fungsi non-linear umpamanya kesan-kesan tepu boleh dimasukkan di dalam penguraian. Hasil-hasil yang lengkap dibentangkan di dalam seksi 6.

TANDANAMA-TANDANAMA GERAFF BOND

Di dalam kertas ini model-model akan dibentuk menggunakan satu tandanama seragam untuk semua jenis sistem-sistem jisad yang menyentuh beberapa domen tenaga. Telah dibukti^{1,2,5} bahawa model-model berasaskan berbagai cabang sains-kejuruteraan, boleh digambarkan dengan menggunakan tandanama graf bond dan teknik-teknik yang berkaitan. Berasaskan kepada cara ini, sifat dasar bahagian-bahagian sesuatu model dan sikap bagaimana bahagian-bahagian ini saling mempengaruhi antara satu dengan lain akan dapat dibuktikan dengan menggunakan satu format gambarajah. Jadi perbezaan di antara satu jenis sistem dengan sistem yang lain boleh dipertunjukkan dan juga pengalaman di satu bidang boleh dipergunakan untuk bidang yang lain.

Model-model graf bond untuk sistem-sistem letrik, jentera, haiderol, numat, haba dan lain-lain boleh dibentuk dengan menggunakan sebilangan kecil set elemen yang ideal. Jika teknik-teknik piawai¹ digunakan, model-model ini boleh diterjemahkan kepada persamaan-persamaan kerbedaan atau skim-skim selakunan untuk komputer.

Tambahan Yang Perlu Kepada Elemen-elemen Graf Bond Untuk Proses-proses Penukaran Tenaga Letromekanik

Di dalam penukaran tenaga letromekanik pengaruh di antara tenaga-tenaga mekanik dan letrik berlaku di dalam media pengantaraan yang sama, iaitu domen tenaga magnet. Elemen-elemen graf bond yang biasa^{1,2} digunakan adalah ditafsirkan oleh dayaguna dan aliran di mana butir-butir ini jelas diterangkan di kedua-dua belah bond yang berkaitan. Kuantiti-kuantiti anjakan dan momentum biasanya dikaitkan dengan cara tidak tepat. Jadi satu tandanama graf bond yang berasingan perlu diwujudkan untuk menerangkan dengan jelas angkubah-angkubah tenaga,

perties such as the magnetomotive force and flux linkage would be a desirable innovation.

Based on a special property of the gyrator it can be shown⁵ that two new 2-port elements may be derived such that the terminal electrical power may be coupled to the associated electromagnetic or electrostatic energies. Since both the field energies and the terminal power share a common intensive variable a simple integral relationship must exist between the field energies and the terminal power.

From the definition^{1,2} of momentum $\lambda(t)$ and displacement $q(t)$, an expression involving the D-operator may be written as,

$$\lambda(t) = e(t)/D \quad (1)$$

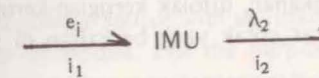
and

$$q(t) = i(t)/D \quad (2)$$

With the condition for conservation of power satisfied, the characteristic of one of the elements involving Eqn. 1 is:

$$\begin{bmatrix} \lambda_2 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/D & \\ & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

This 2-port element termed as inductance mutator has the important function of bonding the applied power minus resistance losses at port 1 to the associated magnetic energy mutated at port 2. The bond graph structure is:



The bond at port 2 may be referred to as an energy bond since it displays explicitly the energy variable, $\lambda_2(t)$. The energy $E(t)$ may be expressed as:

$$E(t) = \int^t i(t) d\lambda(t) \quad (4)$$

For the cases in which an effort is a function of a displacement or a flow is a function of a momentum, then the energy can be expressed not only as a function of time but also as a function of one of the energy variables, thus:

$$\begin{aligned} E(q) &= \int^q e(q) dq &) \\ \text{or} & &) \\ E(\lambda) &= \int^\lambda i(\lambda) d\lambda &) \end{aligned} \quad (5)$$

khususnya sifat-sifat dasar medan magnet seperti upaya gerak-magnet dan perangkaian uratdaya.

Berdasarkan kepada satu sifat khas yang istimewa, satu elemen 2-pot yang baru boleh diturunkan⁵ supaya kuasa letrik di terminal boleh dihubungkan kepada tenaga-tenaga letromagnet dan letrostatik yang berkaitan. Oleh kerana tenaga-tenaga medan dan kuasa di terminal berkongsi satu angkubah intensif yang serupa, jadi, satu perhubungan pengkamil yang mudah patut wujud di antara tenaga-tenaga medan dan kuasa di terminal.

Dengan menggunakan penjelasan^{1,2} untuk momentum $\lambda(t)$ dan anjakan $q(t)$, satu pernyataan yang mengandungi operator-D boleh ditulis sebagai:

$$\lambda(t) = e(t)/D \quad (1)$$

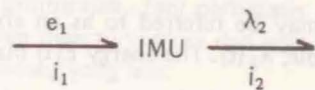
dan

$$q(t) = i(t)/D \quad (2)$$

Dengan syarat hukum keabadian kuasa dipatuhi, ciri satu daripada elemen-elemen yang diterangkan di dalam Pers. 1 ialah:

$$\begin{bmatrix} \lambda_2 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/D & \\ & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Elemen 2-pot ini yang dinamakan sebagai mutator aruhan mempunyai tugas penting untuk menyambungkan kuasa tekanan, ditolak kerugian-kerugian rintangan di pot 1, dengan tenaga magnet bertukar corak yang berkaitan di pot 2. Struktur graf bond ini ialah:



Bond yang berada di pot 2 boleh dianggap sebagai bond tenaga oleh kerana ia menerangkan dengan jelas angkubah tenaga, $\lambda_2(t)$. Angkubah tenaga $E(t)$ boleh diterangkan sebagai:

$$E(t) = \int^t i(t) d\lambda(t) \quad (4)$$

Untuk kes-kes di mana dayaguna ialah satu fungsi anjakan ataupun aliran ialah satu fungsi momentum, tenaga ini boleh diterangkan bukan sahaja sebagai fungsi masa tetapi juga sebagai fungsi satu daripada angkubah-angkubah tenaga, jadi:

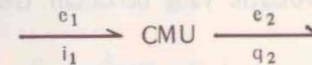
$$\begin{aligned} E(q) &= \int^q e(q) dq \\ \text{atau} \\ E(\lambda) &= \int^\lambda i(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

The above equations justify λ and q being termed as energy variables in distinction to the power variables e and i .

In the electrostatic field energy domain, the corresponding element is the capacitance mutator whose characteristic is given by:

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1/D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Consequently, the capacitance mutator relates the applied terminal power to the associated stored electrostatic field energy. The bond graph representation is:



The interconnection of energy bonds require an extension in defining the 0- and 1- junctions. It follows that the 0- junction may be termed as a common flux junction. Similarly in the energy domain, the 1- junction is a common charge junction.

BOND GRAPH REPRESENTATION OF A THREE - PHASE SYNCHRONOUS GENERATOR UNDER STEADY - STATE CONDITIONS

Under balanced steady - state conditions, the representation of one phase of the three - phase synchronous machine by the equivalent phase circuit where the machine appears as a voltage source with an internal impedance has been extensively used for a variety of studies. For the purpose of this section the bond graph model will be based on such a representation; however, consideration will be made to enable the machine to operate in a unbalanced three - phase mode.

The polyphase synchronous generator is the standard device used in power systems for converting rotary mechanical energy into electromagnetic energy. Viewed in the present context, the generator is simply a transducer modulated by the direct current in the field windings on the rotor.

Ideally, under steady - state conditions, the three - phase synchronous generator may be considered as a primitive lossless transducer of the form:

$$\begin{aligned} E &= K\omega \\ T &= KI \end{aligned} \quad (7)$$

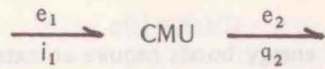
where $[T, \omega]$ are the steady - state values of shaft torque and speed and $[E, I]$ are the steady - state values of the matrix of phase emfs (E_a, E_b, E_c) and the matrix of phase currents (I_a, I_b, I_c) respectively. The gyrator modulus matrix, $K = (K_a, K_b, K_c)$, depends upon magnetizing inductance M_F .

Persamaan-persamaan di atas membuktikan bahawa λ dan q ialah angkubah-angkubah tenaga dan ini berbeza daripada angkubah-angkubah kuasa e dan i .

Untuk domen tenaga medan letrostatik, elemen yang bersangkutan ialah mutator kapasitan yang mana ciri-cirinya diberi sebagai:

$$\begin{bmatrix} e_2 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \\ & 1/D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Jadi, mutator kapasitan akan menghubungkan kuasa tekanan di terminal dengan tenaga simpanan medan letrostatik yang berkaitan. Graf bond ini ialah seperti berikut:



Perhubungan saling di antara bond-bond tenaga menentukan bahawa simpang-simpang-0 dan -1 perlu diterangkan dengan nyata. Jadi oleh kerana itu simpang-0 boleh dianggap sebagai simpang uratnya bersama. Seterusnya simpang -1 ialah simpang cas bersama.

GERAF BOND UNTUK MENGGAMBARKAN JANAKUASA SEGERAK 3-FASA DI BAWAH KEADAAN TETAP

Di bawah keadaan-keadaan tetap, untuk beberapa kajian, cara untuk menggambarkan satu daripada 3-fasa kerap kali menggunakan litar fasal samanilai di mana mesin segerak ini merupakan satu sumber voltan mempunyai galangan di dalam. Untuk seksi ini model gerak bond akan berasaskan bentuk ini. Perhatian akan juga ditumpukan kepada mesin yang berjalan secara 3-fasa tidak seimbang.

Janakuasa segerak multifasa ialah alat piawai yang digunakan di dalam sistem kuasa untuk menukarkan tenaga jentera putar kepada tenaga letromagnet. Apabila dilihat pada sudut ini, janakuasa tersebut ialah hanya satu teranduser yang disuaitalakan oleh arus terus di dalam lilitan medan yang dibentuk sebagai rotor.

Sebaiknya, di bawah keadaan tetap, janakuasa segerak 3-fasa boleh dianggap sebagai satu teranduser primitif tanpa kerugian yang diterangkan oleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned} E &= K\omega \\ T &= KI \end{aligned} \quad (7)$$

di mana $[T, \omega]$ adalah nilai keadaan tetap untuk kilas aci dan laju dan $[E, I]$ adalah nilai keadaan tetap untuk matrik emfs fasa (E_a, E_b, E_c) dan matrik arus fasa (I_a, I_b, I_c). Matrik modula untuk kisar, $K = (K_a, K_b, K_c)$, bergantung kepada aruhan pemagnetan, M_F .

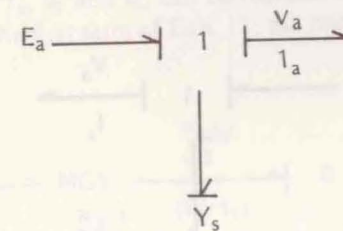
From the expression for steady - state no - load voltage³, the gyrator modulus matrix may be derived as:

$$\begin{aligned} K_a &= \frac{1}{\sqrt{2}} M_F I_F < 0^\circ \\ K_b &= \frac{1}{\sqrt{2}} M_F I_F < -120^\circ \\ K_c &= \frac{1}{\sqrt{2}} M_F I_F < 120^\circ \end{aligned} \quad (8)$$

and from which the phase emfs or the no - load voltages (E_a, E_b, E_c), may be expressed by:

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{1}{\sqrt{3}} (K_c - K_b) \omega \\ &= j \frac{M_F I_F}{\sqrt{2}} < 0^\circ \\ E_b &= \frac{1}{\sqrt{3}} (K_a - K_c) \omega \\ &= j \frac{M_F I_F}{\sqrt{2}} < -120^\circ \\ E_c &= \frac{1}{\sqrt{3}} (K_b - K_a) \omega \\ &= j \frac{M_F I_F}{\sqrt{2}} < 120^\circ \end{aligned} \quad (9)$$

A three - phase synchronous generator represented by a voltage source with an internal admittance in each phase, has a bond graph for phase 'a' given by:



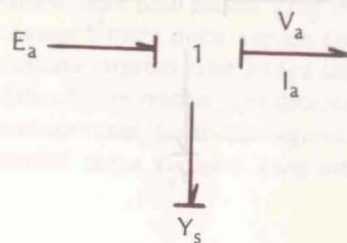
Daripada persamaan voltan tanpa beban di bawah keadaan tetap³, matrik modula untuk kisar boleh diturunkan seperti:

$$\begin{cases} K_a = \frac{1}{\sqrt{2}} M_F I_F < 0^\circ \\ K_b = \frac{1}{\sqrt{2}} M_F I_F < -120^\circ \\ K_c = \frac{1}{\sqrt{2}} M_F I_F < 120^\circ \end{cases} \quad (8)$$

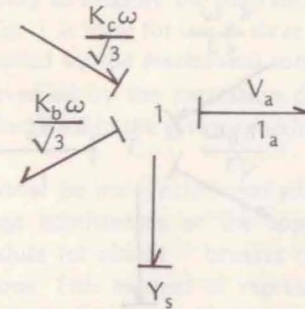
dan daripada ini emfs fasa ataupun voltan-voltan tanpa beban (E_a, E_b, E_c), boleh ditulis sebagai:

$$\begin{cases} E_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(K_c - K_b) \omega \\ = j \frac{M_F I_F}{\sqrt{2}} < 0^\circ \\ E_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(K_a - K_c) \omega \\ = j \frac{M_F I_F}{\sqrt{2}} < -120^\circ \\ E_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(K_b - K_a) \omega \\ = j \frac{M_F I_F}{\sqrt{2}} < 120^\circ \end{cases} \quad (9)$$

Satu janakuasa segerak 3-fasa boleh digambarkan sebagai sumber voltan yang mempunyai satu lepasan dalam untuk tiap-tiap fasa dan akan mempunyai graf bond untuk fasa 'a' sebagai:



From Eqn. 9, the phase emf E_a , can be shown to consist of two components, $K_c \omega / \sqrt{3}$ and $K_b \omega / \sqrt{3}$. Thus the above bond graph can be expanded as:



The structure shown can also be derived for phases 'b' and 'c'.

In order to proceed with the modelling of steady - state synchronous machine, it is necessary to introduce the concept of 'phase' torque. The total torque expressed in terms of the 'phase' torques T_a, T_b and T_c is:

$$T = T_a + T_b + T_c \quad (10)$$

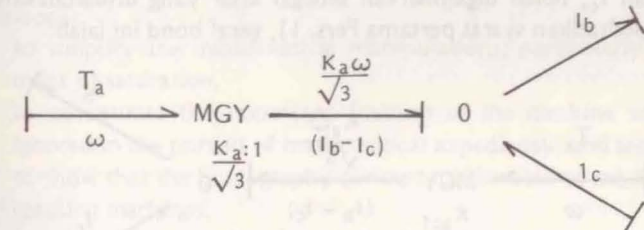
where for balanced operations $T_a = T_b = T_c = T/3$.

In terms of phase currents, the total torque is:

$$T = \frac{P}{\sqrt{3}} [K_a(I_b - I_c) + K_b(I_c - I_a) + K_c(I_a - I_b)] \quad (11)$$

where P is the number of pole pairs.

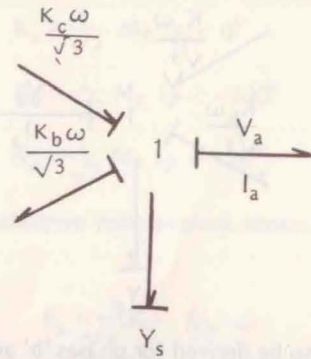
The transducer relationships between the rotational speed ω , torques T_a, T_b and T_c , and phase currents I_a, I_b and I_c , can be represented by the modulated gyrator MGY^{1,2}. Considering the first term of Eqn. 11, the bond graph is:



Similar structures can be derived for the other two terms.

By appropriately arranging the bond graph structures for each electrical and mechanical phases, the bond graph for the three phase synchronous generator may be represented by Fig. 1. This diagram shows that the mechanical energy is trans-

Daripada Pers. 9, emfs fasa, E_a , boleh dikatakan mempunyai 2 komponen, iaitu $K_c \omega / \sqrt{3}$ dan $K_b \omega / \sqrt{3}$. Jadi graf bond boleh diluaskan sebagai:



Struktur yang ditunjukkan di atas boleh diwujudkan untuk fasa-fasa 'b' dan 'c'.

Untuk meneruskan tindakan mengeluarkan satu model untuk mesin segerak di bawah keadaan tetap, adalah mustahak diperkenalkan konsep kilas 'fasa'. Kilas total boleh diterangkan di dalam istilah kilas fasa T_a , T_b dan T_c sebagai:

$$T = T_a + T_b + T_c \quad (10)$$

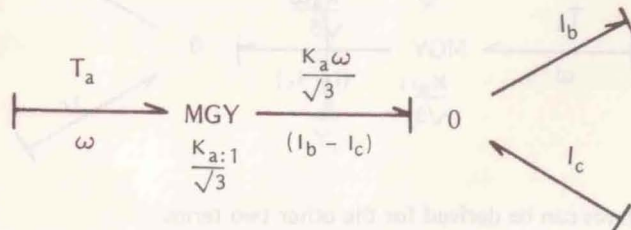
di mana untuk perjalanan seimbang $T_a = T_b = T_c = T/3$.

Di dalam istilah arus fasa, kilas total ialah:

$$T = \frac{P}{\sqrt{3}} [K_a(I_b - I_c) + K_b(I_c - I_a) + K_c(I_a - I_b)] \quad (11)$$

di mana P ialah bilangan kutubsepasang.

Perhubungan teranduser di antara laju putaran ω , kilas T_a , T_b dan T_c , dan arus fasa I_a , I_b dan I_c , boleh digambarkan sebagai kisar yang disuaitalakan MGY^{1,2}. Dengan memperhatikan syarat pertama Pers. 11, graf bond ini ialah:



Struktur yang sama boleh juga diwujudkan untuk kedua-dua syarat yang berikut-an.

Jika diaturkan dengan teliti struktur-struktur bond untuk tiap-tiap fasa elektrik dan jentera graf bond untuk janakuasa segerak 3-fasa boleh digambarkan seperti di dalam Raj. 1. Rajah ini menunjukkan bahawa tenaga jentera telah di-

ferred through three separate 0 – junctions each having one – third of the total torque. However, in actual fact there exists only one mechanical port and that the representation chosen serves only to simplify the diagram.

The generator model of Fig. 1 is ideal for use in three – phase load flow studies where the real power is supplied by the mechanical torque at synchronous speed and the reactive power is governed by the excitation current. The effects of unbalanced operations may be included in the gyrator modulus K, which is a function of the phase angles.

The admittance Y_s , can either be the synchronous admittance which consists of both magnetizing and leakage admittances or the appropriate generator admittances, being sub-transient values for circuit – breaker ratings and transient values for protective gear applications. This method of representation requires that the operating conditions and internal admittance of the synchronous machine are initially known.

It will be shown in the next section that the hexagonal struture in Fig. 1 assumes a similar role in the representation of the three – phase synchronous generator under transient conditions. The neutral node n, is shown in the steady state diagram with the dotted line indicating the bonds for a generator with an earthing impedance Z_{nn} .

BOND GRAPH REPRESENTATION OF A THREE – PHASE SYNCHRONOUS GENERATOR UNDER TRANSIENT CONDITIONS

In the following section dynamic bond graph model of one type of electro-mechanical energy converters commonly used will be developed. The inductance mutator is needed to enable the electro-magnetic field energy to be graphically displayed in an elegantly coded structure which may be used to assemble the system equation for solution by either analogue or digital computers.

Previous work in machine analysis tend to express the machine equations in terms of inductance matrices. In this paper bond graph models are used due to the following reasons:

- (i) to simplify the mathematical manipulations; particularly in the treatment of saturation,
- (ii) to accentuate the important features of the machine which may be ignored in the pursuit of mathematical expediency, and also
- (iii) to show that the bond graphy concept can be used to model all types of rotating machines.

Based on the steady – state bond graph for the synchronous generator shown in Fig. 1, the dynamic bond graph may be derived using the usual set^{1,2} [C , L, R, S_e , S_i , TF, GY, O, 1] together with the newly defined IMU. Considering only the electrical phase 'a', the total existing flux linkage λ_a , consist of the main flux

pindahkan melalui 3 simpang -0 yang berasingan. Tiap-tiap satunya mempunyai 1/3 daripada nilai kilas total. Tetapi di dalam keadaan yang sebenarnya hanya satu pot jentera sahaja berada, dan gambaran ini hanya untuk memberi kesimpulan untuk rajah tersebut.

Model janakuasa yang ditunjukkan oleh Raj. 1 adalah sesuai untuk digunakan di dalam pengajian aliran beban 3-fasa di mana kuasa berkesan dikeluarkan oleh kilas jentera dengan had laju segerak dan kuasa reaktif akan tertakluk kepada arus ujaan. Kesan-kesan oleh kerana perjalanan tiada seimbang boleh dimasukkan ke dalam modula K. Ini sebenarnya ialah fungsi sudut-sudut fasa.

Lepasan Y_s , boleh dianggapkan sebagai lepasan segerak yang terdiri daripada lepasan-lepasan pemagnetan dan bocor, ataupun lepasan-lepasan janakuasa yang bersangkutan. Nilai-nilai ini untuk kadar pemutus litar ialah nilai awal-ubatika dan untuk kegunaan gear pelindung nilai ini ialah nilai ubatika. Cara tersebut di atas ini memerlukan keadaan perjalanan dan lepasan dalam dinyatakan terlebih dahulu untuk janakuasa segerak tersebut.

Di dalam seksi yang berikutan struktur segi enam yang ditunjukkan oleh Raj. 1 akan memainkan peranan yang sama untuk janakuasa segerak 3-fasa di bawah keadaan ubatika. Nodan nutral n, yang ditunjukkan di dalam rajah keadaan tetap mempunyai garis-garis bertitik yang menunjukkan bond-bond untuk janakuasa yang mempunyai galangan bumi Z_{nn} .

GERAF BOND UNTUK MENGGAMBARKAN JANAKUASA SEGERAK 3-FASA DI BAWAH KEADAAN UBATIKA

Di dalam seksi berikut model graf bond dinamik untuk sejenis penukar tenaga letromekanik yang biasa dipakai akan dibentangkan. Mutator arohan perlu digunakan untuk memberi gambaran yang jelas dan teratur berhubung dengan keadaan tenaga medan letromagnet. Di samping itu gambaran ini akan memberi struktur yang disusun dengan kemas dari mana persamaan-persamaan sistem boleh diatur untuk uraian oleh komputer-komputer digital ataupun analogue.

Kertas-kertas ke belakang menyentuh penguraian mesin dengan menggunakan matriks-matriks arohan. Di dalam kertas ini model-model graf bond akan digunakan oleh kerana sebab-sebab yang berikut:

- (i) Untuk memudahkan penggunaan hisab; terutamanya di dalam mengkaji keadaan tepu.
- (ii) Supaya dapat menimbul sifat-sifat mustahak sesuatu mesin yang mungkin diketepikan di dalam usaha mencari kesimpulan hisab yang lebih mudah, dan juga,
- (iii) untuk menunjukkan bahawa konsep graf bond boleh digunakan untuk semua model mesin-mesin putar tiada kira jenis.

Berdasarkan kepada graf bond untuk janakuasa di bawah keadaan tetap seperti ditunjukkan di dalam Raj. 1, graf bond yang dinamik boleh diwujudkan dengan menggunakan set biasa^{1,2} [C, L, R, S_e , S_i , TF, GY, 0, 1] bersamaan dengan IMU yang telah dijelaskan tadi. Dengan menumpukan kepada fasa letrik 'a', perangkaian uratdaya total yang terdapat iaitu λ_a , terdiri daripada perangkaian uratdaya yang pen-

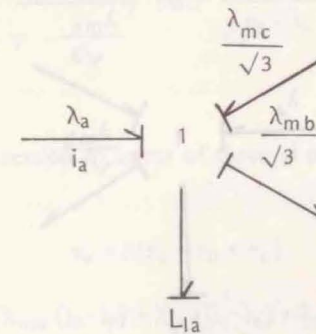
linkage λ_{ma} , which contributes to the energy conversion process, and the leakage flux linkage λ_{la} ($= L_{la} i_a$), thus:

$$\lambda_a = \lambda_{ma} + L_{la} i_a \quad (12)$$

From Eqn. 9 for the steady - state machine, the corresponding dynamic equations express the relationships between the main flux linkages for the three phases, such that:

$$\begin{aligned} \lambda_{ma} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\lambda_{mc} - \lambda_{mb}) \\ \lambda_{mb} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\lambda_{ma} - \lambda_{mc}) \\ \lambda_{mc} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (\lambda_{mb} - \lambda_{ma}) \end{aligned} \quad (13)$$

The bond graph showing the energy bonds which satisfy Eqns. 12 and 13 is:



where the direction of energy flow indicates generator action. At the terminal, the total flux linkage for phase 'a' is subjected to the constraint given by:

$$\lambda_a = v_a + i_a r_a \quad (14)$$

Using the inductance mutator the energy bond for the total flux linkage may be coupled to the power applied or removed at the terminal, and the resulting bond graph is:

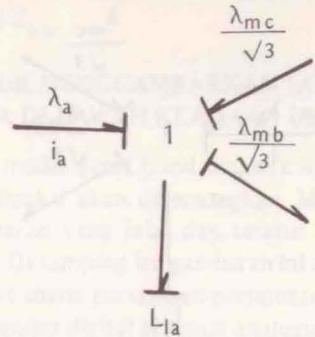
ting λ_{ma} , yang memainkan peranan yang istimewa di dalam proses penukaran tenaga, dan perangkaian uratdaya bocor $\lambda_{ia} (= L_{ia}i_a)$, jadi:

$$\lambda_a = \lambda_{ma} + L_{ia} i_a \quad (12)$$

Daripada Pers. 9 untuk mesin di bawah keadaan tetap, persamaan dinamik berikut menerangkan perhubungan di antara perangkaian-perangkaian uratdaya yang penting untuk ketiga-tiga fasa, seperti:

$$\begin{aligned} \lambda_{ma} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\lambda_{mc} - \lambda_{mb}) \\ \lambda_{mb} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\lambda_{ma} - \lambda_{mc}) \\ \lambda_{mc} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\lambda_{mb} - \lambda_{ma}) \end{aligned} \quad (13)$$

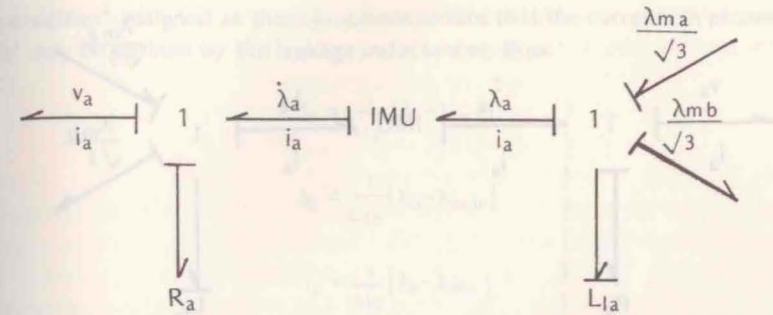
Graf bond yang menunjukkan bond-bond tenaga mengikut kaidah persamaan 12 dan 13 ialah:



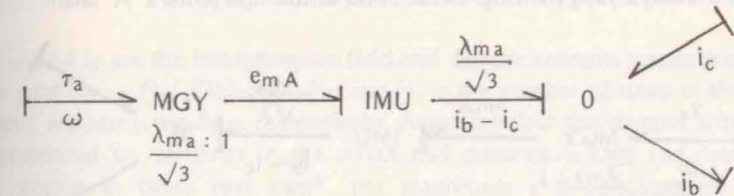
di mana arah tuju untuk aliran tenaga menunjukkan perjalanan sebagai sebuah janakuasa. Di terminal yang berkaitan, perangkaian uratdaya total untuk fasa 'a' tertakluk kepada sekatan yang diberi sebagai:

$$\lambda_a = v_a + i_a r_a \quad (14)$$

Dengan menggunakan mutator arohan, bond tenaga untuk kesemua perangkaian uratdaya boleh dihubungkan kepada kuasa tekanan ataupun kuasa pindahan di terminal tersebut, dan graf bond yang dihasilkan ialah:



The conversion of mechanical power into magnetic energy may be graphically represented following the same procedure as above, but, in addition may require the introduction of the MGY whose modulus is a function of the main flux linkage. The bond graph for mechanical phase 'A' is:



The electrical torque expression in terms of three - phase quantities may be given as:

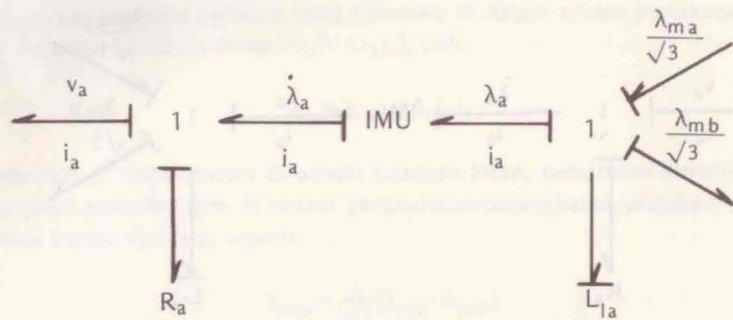
$$\tau_e = P(\tau_a + \tau_b + \tau_c)$$

$$\tau_e = \frac{P}{\sqrt{3}} [\lambda_{ma} (i_b - i_e) + \lambda_{mb} (i_c - i_a) + \lambda_{mc} (i_a - i_b)] \quad (15)$$

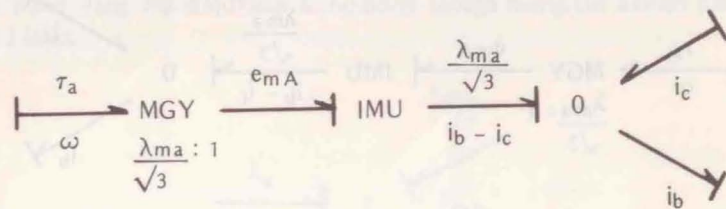
where P is the number of pole pairs.

Following the same steps taken for the steady - state model, the derived bond graphs shown above may be used to assemble the complete dynamic model. The final bond graph is shown in Fig. 2. The structure within the dotted circle represents the magnetic energy interactions between the mechanical and electrical phases of the synchronous generator. However in Fig. 2, the excitation system is represented only by the moduli of the modulated gyrators. A separate bond graph of the excitation system may be easily derived using the same method as outlined.

From the bond graph of Fig. 2, the machine equations may be organized in a routine manner. Considering the 1 - junction making up the hexagonal structure,



Penukaran kuasa jentera kepada tenaga magnet akan boleh digambarkan dengan mengikuti aturan yang tersebut di atas. Tetapi gambaran lengkap memerlukan satu langkah di mana MGY boleh dikaitkan. Modula MGY ini ialah satu fungsi untuk rangkaian uratdaya yang penting. Geranf bond untuk fasa jentera 'A' ialah:



Persamaan-persamaan kilas letrik di dalam istilah kuantiti-kuantiti 3-fasa boleh diberi sebagai:

$$\tau_e = P(\tau_a + \tau_b + \tau_c)$$

atau

$$\tau_e = \frac{P}{\sqrt{3}} [\lambda_{ma}(i_b - i_c) + \lambda_{mb}(i_c - i_a) + \lambda_{mc}(i_a - i_b)] \quad (15)$$

di mana P ialah bilangan ketupsepasang.

Dengan mengikut langkah yang sama seperti model keadaan tetap, geranf bond yang wujud di atas boleh digunakan untuk membentukkan model dinamik yang lengkap. Geranf bond yang dihasilkan adalah seperti yang ditunjukkan di dalam Raj. 2. Struktur di dalam bulatan yang bertitik menunjukkan keadaan saling mempengaruhi di antara fasa-fasa jentera dan letrik untuk janakuasa segerak. Tetapi di dalam Raj. 2, sistem-sistem ujaan adalah diterangkan hanya sebagai modula-modula untuk kisar-kisar yang disuaitalkan. Geranf bond yang berasingan untuk sistem ujaan boleh diturunkan dengan menggunakan cara yang sama.

Daripada geranf bond yang ditunjukkan oleh Raj. 2, persamaan-persamaan mesin boleh diaturkan dengan cara yang biasa. Dengan menumpukan perhatian kepada simpang -1 yang menghasilkan struktur bersegienam, kesabatan¹ yang diberi kepa-

the causalities¹ assigned at these junctions ensure that the currents in phases 'a', 'b' and 'c' may be defined by the leakage inductances, thus:

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{1}{L_{la}} [\lambda_a - \lambda_{ma}] \\ i_b &= \frac{1}{L_{lb}} [\lambda_b - \lambda_{mb}] \\ i_c &= \frac{1}{L_{lc}} [\lambda_c - \lambda_{mc}] \end{aligned} \quad (16)$$

Eqn. 16 requires that the main flux linkage of each phase be known initially. These flux linkages are related to the total excitation of the main armature flux i_e , which may be determined by the relation⁶:

$$i_e \cos \alpha = i_F + N_{dF} i_D + N_{aF} (i_a + i_b + i_c) \quad (17)$$

where i_F and i_D are the instantaneous field and damper currents respectively; $N_{dF} = N_d/N_F$ and $N_{aF} = N_a/\sqrt{2}N_F$; N_d , N_F and N_a is the number of turns of the damper, field and armature windings respectively. Assuming that the damper windings can be represented by windings in the direct and quadrature axes and resolving the mmfs' vector in these two axes⁶, the magnitude and direction of the total excitation current is:

$$\begin{aligned} i_e \cos \alpha &= i_F + N_{dF} i_D + N_{aF} [i_a \cos \theta_1 + i_b \cos \theta_2 + i_c \cos \theta_3] \\ i_e \sin \alpha &= N_{qF} i_Q + N_{aF} [i_a \sin \theta_1 + i_b \sin \theta_2 + i_c \sin \theta_3] \end{aligned} \quad (18)$$

where θ_1 is the field axis displacement angle from the axis of phase 'a', $\theta_2 = \theta_1 - 120^\circ$, $\theta_3 = \theta_1 + 120^\circ$, i_D and i_Q are the damper currents in the direct and quadrature axes respectively.

The no-load magnetization curve of the synchronous machine can be easily determined by subjecting it to an open circuit test. Using this curve the non-linear relationship between the excitation current i_e , and the armature flux linkage λ_m , may be expressed by:

$$\lambda_m = f(i_e) \quad (19)$$

where the function $f(i_e)$, is defined by the no load curve as shown in Fig. 3.

The phase component of the armature flux linkage may be obtained by resolving λ_m and is given by:

da simpang-simpang ini menentukan bahawa arus-arus di fasa-fasa 'a', 'b' dan 'c' boleh diterangkan dengan menggunakan arohan-arohan bocor, seperti:

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{1}{L_{1a}} [\lambda_a - \lambda_{ma}] \\ i_b &= \frac{1}{L_{1b}} [\lambda_b - \lambda_{mb}] \\ i_c &= \frac{1}{L_{1c}} [\lambda_c - \lambda_{mc}] \end{aligned} \quad (16)$$

Persamaan 16 mewajibkan bahawa perangkaian uratdaya yang penting untuk tiap-tiap fasa patut ditentukan dari mulanya. Perangkaian uratdaya ini ada berkaitan dengan ujaan total untuk uratdaya angker yang penting iaitu, i_e . Ini boleh diterangkan dengan persamaan berikut:⁶

$$i_e \cos \alpha = i_F + N_{dF} i_d + N_{aF} (i_a + i_b + i_c) \quad (17)$$

di mana i_F dan i_d adalah arus-arus medan dan pelembab untuk satu ketika; $N_{dF} = N_d/N_F$ dan $N_{aF} = N_a/\sqrt{2N_F}$; N_d , N_F dan N_a ialah bilangan lilitan untuk pelembab, medan dan angker. Jika lilitan pelembab boleh dianggap sebagai dua lilitan di dalam paksi-paksi terus dan segi dan dengan menguraikan vektor mmfs' dalam dua paksi, magnitud dan arah tuju untuk arus ujaan total ialah:

$$\begin{aligned} i_e \cos \alpha &= i_F + N_{dF} i_d + N_{aF} [i_a \cos \theta_1 + i_b \cos \theta_2 + i_c \cos \theta_3] \\ i_e \sin \alpha &= N_{qF} i_Q + N_{aF} [i_a \sin \theta_1 + i_b \sin \theta_2 + i_c \sin \theta_3] \end{aligned} \quad (18)$$

di mana θ_1 ialah sudut anjakan untuk paksi medan diukur daripada paksi untuk fasa 'a', $\theta_2 = \theta_1 - 120^\circ$, $\theta_3 = \theta_1 + 120^\circ$, i_d dan i_Q ialah arus-arus pelembab di dalam paksi-paksi terus dan segi.

Untuk mesin segerak ini lengkungan pemagnetan tanpa beban boleh ditetapkan dengan menggunakan ujian litar terbuka. Dengan menggunakan lengkungan ini perhubungan non-linear di antara arus ujaan i_e , dan perangkaian uratdaya angker λ_m , boleh diterangkan sebagai:

$$\lambda_m = f(i_e) \quad (19)$$

di mana fungsi $f(i_e)$, boleh dinyatakan dengan menggunakan lengkungan tanpa beban yang ditunjukkan oleh Raj. 3.

Komponen fasa untuk perangkaian uratdaya angker boleh didapati dengan menguraikan λ_m , dan ini ditulis sebagai:

$$\begin{aligned} \lambda_{ma} &= \lambda_m \cos (\theta_1 - \alpha) \\ \lambda_{mb} &= \lambda_m \cos (\theta_2 - \alpha) \\ \lambda_{mc} &= \lambda_m \cos (\theta_3 - \alpha) \end{aligned} \quad (20)$$

Although the dynamic bond graph shown in Fig. 2 does not include the corresponding structure for the field and damper windings, the current equations for these windings may be similarly derived from an identical bond graph. These equations have similar form to that of Eqn. 16 and is given as:

$$\begin{aligned} i_F &= \frac{1}{L_{1F}} [\lambda_F - \sqrt{3} N_{Fa} \lambda_m \cos \alpha] \\ i_D &= \frac{1}{L_{1D}} [\lambda_D - \sqrt{3} N_{Da} \lambda_m \cos \alpha] \\ i_Q &= \frac{1}{L_{1Q}} [\lambda_Q - \sqrt{3} N_{Qa} \lambda_m \sin \alpha] \end{aligned} \quad (21)$$

where λ_F , λ_D and λ_Q are the flux linkages for the field, direct - and quadrature - axis damper windings respectively. The $\sqrt{3}$ factor included in Eqn. 21 is necessary in view of the fact that a three - phase generator is considered.

The currents expressed by the algebraic relationship in Eqns. 16, 18 and 21, together with the non - linear function $f(i_e)$, may be solved by the standard method for the solution of linear equations provided the constraints at the winding terminals imposed by the inductance mutators are adhered. The constraint equations for the three - phase synchronous machine are:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_a &= v_a - i_a R_a \\ \dot{\lambda}_b &= v_b - i_b R_b \\ \dot{\lambda}_c &= v_c - i_c R_c \\ \dot{\lambda}_F &= v_F - i_F R_F \\ \dot{\lambda}_D &= -i_D R_D \\ \dot{\lambda}_Q &= -i_Q R_Q \end{aligned} \quad (22)$$

where R are the resistances of the windings and v are the terminal voltages, with the appropriate subscript indicating the particular winding.

The computer method required to solve the mixed differential/algebraic equations derived from the bond graph model is discussed in detail in References 7 and 8.

$$\begin{aligned} \lambda_{ma} &= \lambda_m \cos(\theta_1 - \alpha) \\ \lambda_{mb} &= \lambda_m \cos(\theta_2 - \alpha) \\ \lambda_{mc} &= \lambda_m \cos(\theta_3 - \alpha) \end{aligned} \quad (20)$$

Sungguhpun graf bond dinamik yang ditunjukkan di dalam Raj. 2 tiada mengandungi struktur-struktur berkaitan untuk lilitan-lilitan medan dan pelambab, persamaan-persamaan arus untuk lilitan-lilitan ini boleh dihasilkan daripada graf bond yang sama. Persamaan-persamaan ini mempunyai bentuk sama dengan Pers. 16 dan diberi sebagai:

$$\begin{aligned} i_F &= \frac{1}{L_{IF}} [\lambda_F - \sqrt{3} N_{Fa} \lambda_m \cos \alpha] \\ i_D &= \frac{1}{L_{ID}} [\lambda_D - \sqrt{3} N_{Da} \lambda_m \cos \alpha] \\ i_Q &= \frac{1}{L_{IQ}} [\lambda_Q - \sqrt{3} N_{Qa} \lambda_m \sin \alpha] \end{aligned} \quad (21)$$

di mana λ_F , λ_D dan λ_Q ialah perangkaian-perangkaian uratnya untuk lilitan-lilitan medan, pelambab-pelambab terus dan segi. Faktor $\sqrt{3}$ yang dimasukkan di dalam Pers. 21 ialah mustahak memandangkan bahawa kajian ini berkait dengan janakuasa 3-fasa.

Arus-arus yang ditetapkan oleh persamaan aljebra di dalam Pers. 16, 18 dan 21, bersama dengan fungsi non-linear $f(i_e)$, boleh diuraikan dengan menggunakan cara-cara biasa untuk menyelesaikan persamaan-persamaan linear tertakluk kepada sekatan-sekatan di terminal-terminal sepertimana yang diwajibkan oleh mutator-mutator arohan. Untuk mesin segerak 3-fasa persamaan-persamaan sekatan ini ialah:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_a &= v_a - i_a R_a \\ \dot{\lambda}_b &= v_b - i_b R_b \\ \dot{\lambda}_c &= v_c - i_c R_c \\ \dot{\lambda}_F &= v_F - i_F R_F \\ \dot{\lambda}_D &= -i_D R_D \\ \dot{\lambda}_Q &= -i_Q R_Q \end{aligned} \quad (22)$$

di mana R ialah rintangan-rintangan lilitan dan v ialah voltan-voltan di terminal dengan subscript berkenaan menerangkan lilitan yang berkaitan.

Cara komputer untuk menyelesaikan persamaan-persamaan perbedaan/aljebra bercampuraduk yang dihasilkan daripada model graf bond ini telah diterangkan dengan jelas di dalam rujukan-rujukan 7 dan 8.

COMPUTER METHODS IN BOND GRAPHS ANALYSIS

In the preceding sections, bond graphs of electromechanical energy converters have been developed from which the systems equations are derived using the principle of causal relations. However, based on this algorithm bond graph models of multiport systems may be transformed not manually but by digital computers to equation form, enabling dynamic response to be obtained, thereby allowing direct digital simulation.

The first step is therefore taken by the analyst, who develops a multiport model in bond graphs notations. The next two steps of the procedure are performed by the computer which selects state variables of physical significance, formulates a set of state - space equations, and calculates the response indicated by the formulation. The ENPORT program, developed at MIT is an initial realization of this bond graph reduction algorithm and is described elsewhere¹.

For electromechanical energy conversion studies the information contained in the bond graphs may be translated by such a program into one of the following numerical forms. The first form is available as a standard commercial package and has been used in investigating lumped parameter models having unstable regimes of operation⁷. The method involves the use of the Runge - Kutta - Merson in conjunction with the Newton - Raphson methods.

The alternative method which is gaining greater acceptance in recent times is often referred to as the implicit integration method⁸. It involves basically the approximation of the derivative of the dependent variables in terms of the Taylor expansion and the solving of the eventual algebraic equations by a single Newton iteration process.

1. Techniques for Introducing Non-Linear Functions

Non-linear functions such as the no-load magnetization characteristics are introduced into Eqns. 21 and 22 by using linear interpolation and extrapolation routines. As shown in Fig. 4, the non-linear function Z_k may be expressed in terms of t , $\underline{x}(t)$ and $\underline{y}(t)$ where $\underline{x}(t) = x_1, x_2 \dots x_p$; $\underline{y}(t) = y_1, y_2 \dots y_q$; p is the number of first order x derivatives and q is the number of algebraic dependent variables y .

This method requires that a relationship between Y_k and Z_k be predetermined before the commencement of the computation cycle. In general, therefore, to include the effects of m nonlinear functions $\underline{Z} = Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_m$, the mixed differential and algebraic equations may be written as:

$$\dot{x}_r = F_r[t, \underline{x}(t), \underline{y}(t), \underline{Z}]$$

$$0 = G_s [t, \underline{x}(t), \underline{y}(t), \underline{Z}] \quad (23)$$

ini diselesaikan dengan menggunakan cara-cara kamilan/ulangan sepertimana diterangkan di dalam kertas-kertas berasingan. Satu persamaan tambahan am berupa:

$$Y_u = H_u [t, \underline{x}(t), \underline{y}(t)] \quad (24)$$

di mana $u = 1, 2, 3, \dots, m$, adalah perlu untuk mengeluarkan fungsi non-linear Z . Untuk angkuah yang ke k , seperti yang ditunjukkan dalam Raj. 4, satu jadual untuk kodinet $Y_k - Z_k$ perlu ditetapkan dan kemudiannya disimpan di dalam sub-routine berkenaan. Di tiap-tiap langkah kamilan/ulangan, Y_k dikira dan Z_k yang bersangkutan dinilai dengan menggunakan Raj. 4 mengikut cara-cara tentuanluar.

Pada dasarnya cara ini memerlukan fungsi non-linear yang terus dipecahkan kepada langkah-langkah kecil; yang mana kejituannya tertakluk kepada bilangan kodinet $Y_k - Z_k$ yang diketahui dan cara bagaimana Z_k ditukargantikan di dalam proses penyelesaian.

CONTOH UNTUK PENGURAIAN KOMPUTER

Penguraian dengan menggunakan komputer tertumpu kepada penyelesaian persamaan-persamaan mesin yang telah diterangkan di seksi-seksi yang kebelakangan. Janakuasa segerak diujikan tertakluk kepada litar-pintas fasa-ke-nutral dan litar-pintas tiga-fasa semukor darimana oscillogram-oscillogram selaku boleh dikaji. Cara ini boleh diubahsuaikan untuk mempelajari beberapa jenis penukar-penukar tenaga letromekanik yang digunakan pada masa ini.

1. Ujian Selaku Ke Atas Janakuasa Segerak

Untuk ujian ini satu janakuasa segerak tiga-fasa, 1290 KVA, 6KV dengan mempunyai 20 kutub telah digunakan. Janakuasa ini dikenakan dengan satu litar-pintas talian-ke-nutral di fasa 'c' dengan litar-litar fasa 'a' dan fasa 'b' terbuka. Data yang diuji telah direkodkan menggunakan alat pelot-geraf sambutan-pintas. Perbandingan di antara keputusan ujikaji dan selaku, yang dihasilkan daripada penguraian komputer, membuktikan persetujuan yang baik seperti ditunjukkan di Raj. 5. Sungguhpun kerugian arus eddy tiada diambil perhatian, tetapi adalah difahamkan bahawa mesin ini dibina untuk mengurangkan kerugian ini. Juga redaman yang berlebihan telah diperhatikan di dalam keputusan ujikaji, mungkin oleh kerana faktor-faktor yang bersangkutan.

Litar-pintas semukor boleh diselakukan dengan menaklukkan keadaan seperti, $v_a = v_b = v_c$ dan $i_a + i_b + i_c = 0$, kerana janakuasa ini berjalan di bawah beban litar-pintas seimbang. Jadi hanya dua arus-arus fasa dan dua perangkaian-perangkaian uratdaya perlu diselesaikan kerana nilai ketiga boleh dihasilkan daripada nilai-nilai kedua tadi. Juga di dalam kajian ini ciri pemagnetan tanpa-beban telah dilinearkan dengan mengguna garis renggang atau garis samanalai tanpa-tepu yang merupakan

line through the origin and the rated-voltage point on the curve as shown in Fig. 6. Based on the three representations of the magnetization characteristic, the simulated values of symmetrical short-circuit currents may be obtained and the results are shown in Fig. 7.

In the case of this particular machine, the predicted results using the air-gap line are much larger than those obtained from either the exact saturated curve or its unsaturated equivalent. Usually, methods of fault current prediction based on measured linear inductance⁴ tend to over-estimate the experimental results since measurements of machine inductances are often performed at reduced voltages and as such are actually parameters on the air-gap line below point Q in Fig. 6.

CONCLUSIONS

The application here of bond graph analysis to the field of electromechanical energy conversion is only a step towards the establishment of the relatively few bond graph structures which portray the power and energy relationships of the various types of machine. The analysis affords a further approach to the construction, manipulation and solution of the equations of performance and inter-related machine phenomena in a novel and organized manner which is a prerequisite for the obtaining of a new understanding of an established subject.

REFERENCES

1. Karnopp, D.C. and Rosenberg, R.C.: 'Analysis and Simulation of Multiport Systems' (The MIT Press, Cambridge, Mass., 1968).
2. Rosenberg, R.C. and Karnopp, D.C.: 'A Definition of Bond Graph Language', ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Series G, 1972, 94, (3), pp 179-182.
3. Adkins, B.: 'The General Theory of Electrical Machines' (Chapman and Hall, London, 1964).
4. Jones, C.V.: 'The Unified Theory of Electrical Machine' (Butterworths, London, 1967).
5. Ridzuan Salleh, M. and Laughton, M.A.: 'Dynamic Analysis of Field Energy Systems using Bond Graphs', Int. J. Control, 1975, 21 (1), pp. 21-38.
6. Reedy, G., Ali, A.M. and Jones, C.V.: 'Computer-Aided Analysis of Saturated Systems', Proc. IEE, 1971, 118, (12), pp. 1791-1799.
7. Hirst, D.E.: 'Digital Simulation of Non-Linear Dynamic System using Standard Fortran', Electronic Letters, 1971, 7, (4), pp. 102-105.
8. Branin, F.H. Jr., Hogsett, G.R., Lunde, R.L., and Kugel, L.E.: 'ECAP II - A New Electronic Circuit Analysis Program', IEEE Journal of Solid-State State Circuit, 1971, SC-6, (4), pp. 146-166.

APPENDIXES - Data of Test Machine

The magnetization characteristic for the three-phase synchronous generator is given in Fig. 6. The following designed details of the 1290 KVA, 6KV, 50 HZ, 20 poles machine were supplied by the manufacturer, GEC Machine Ltd., Mill Road, Rugby, England.

satu garis daripada punca kodinet kepada titik voltan kadar di atas lengkungan seperti ditunjukkan di dalam Raj. 6. Berdasarkan kepada ketiga-tiga gambaran ciri pemagnetan ini, nilai-nilai selaku untuk arus litar-pintas semukor boleh dihasilkan seperti ditunjukkan di dalam Raj.7.

Dalam contoh ini, keputusan yang diramal apabila menggunakan garis renggang akan memberikan angkaan yang lebih besar daripada yang terdapat jika lengkungan tepu yang tepat ataupun lengkungan samanilai tanpa-tepu digunakan. Selalunya, cara-cara meramalkan arus kerosakan berdasarkan arohan linear yang diukur⁴, memberi nilai yang tinggi jika dibandingkan dengan keputusan yang dapat daripada ujikaji. Ini ialah oleh kerana ukuran arohan-arohan mesin ini dibuat pada voltan yang rendah dan kerana itu parameter-parameter ini sebenarnya terletak di atas garis renggang di bawah titik Q di dalam Raj. 6.

KESIMPULAN

Dengan menggunakan penguraian graf bond ini di dalam bidang penukaran tenaga letromekanik, satu langkah hadapan telah dibuat untuk menentukan sebilangan kecil struktur-struktur graf bond yang menggambarkan perhubungan di antara kuasa dan tenaga untuk beberapa jenis mesin. Penguraian ini telah memberi satu cara yang teratur, istimewa dan mendalam untuk membina, memperlakukan dan menyelesaikan persamaan-persamaan kelakunan dan juga fenomena-fenomena mesin yang bersangkutan. Ini ialah syarat harus untuk memberi fahaman baru kepada satu mata-pelajaran yang pada masa ini sudah terbukti dan nyata.

RUJUKAN:

1. Karnopp, D.C. and Rosenberg, R.C.: 'Analysis and Simulation of Multiport Systems' (The MIT Press, Cambridge, Mass., 1968)
2. Rosenberg, R.C. and Karnopp, D.C.: 'A Definition of Bond Graph Language', ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Series G, 1972, 94, (3), pp. 179-182
3. Adkins, B: 'The General Theory of Electrical Machines' (Chapman and Hall, London, 1964).
4. Jones, C.V.: 'The Unified Theory of Electrical Machines' (Butterworths, London, 1967)
5. Ridzuan Salleh, M. and Laughton, M.A.: 'Dynamic Analysis of Field Energy Systems using Bond Graphs' Int. J. Control, 1975, 21, (1), pp.21-38.
6. Reedy, G., Ali, and Jones, C.V.: 'Computer - Aided Analysis of Saturated Systems', Proc. IEE, 1971, 118, (12), pp. 1791-1799.
7. Hirst, D.E.: 'Digital Simulation of Non-Linear Dynamic System using Standard Fortran', Electronic Letters, 1971, 7, (4), pp. 102-105.
8. Brainin, F.H., Jr. Hogsett, G.R., Lunde, R.L., and Kugel, L.E.: 'ECAP 11 - A New Electronic Circuit Analysis Program' IEEE Journal of Solid - State Circuit, 1971, SC-6, (4), pp. 146-166.

APPENDIK - Data Untuk Mesin Yang Diuji

Ciri pemagnetan untuk janakuasa segerak tiga-fasa telah diberi di dalam Raj. 6. Butir-butir binaan berikut untuk mesin 1290KVA, 6KV, 50Hz, 20 Kutub telah disediakan oleh pembuatnya, GEC Machine Ltd., Mill Road, Rugby, England.

$$I_a = 0.01331 \text{ H} \quad R_a = 0.587 \Omega \text{ at } 75^\circ\text{C}$$

$$I_F = 0.04270 \text{ H} \quad R_F = 0.20 \Omega \text{ at } 75^\circ\text{C}$$

$$I_D = I_Q = 0.0866 \text{ H} \quad R_D = R_Q = 1.28 \Omega \text{ at } 75^\circ\text{C}$$

Effective number of turns of amature winding per phase = 364.

Effective number of turns of field winding per pole = 52½

Effective number of turns of damper winding per pole = 8



$$l_a = 0.0133 \text{ H} \quad R_a = 0.587 \Omega \text{ at } 75^\circ\text{C}$$

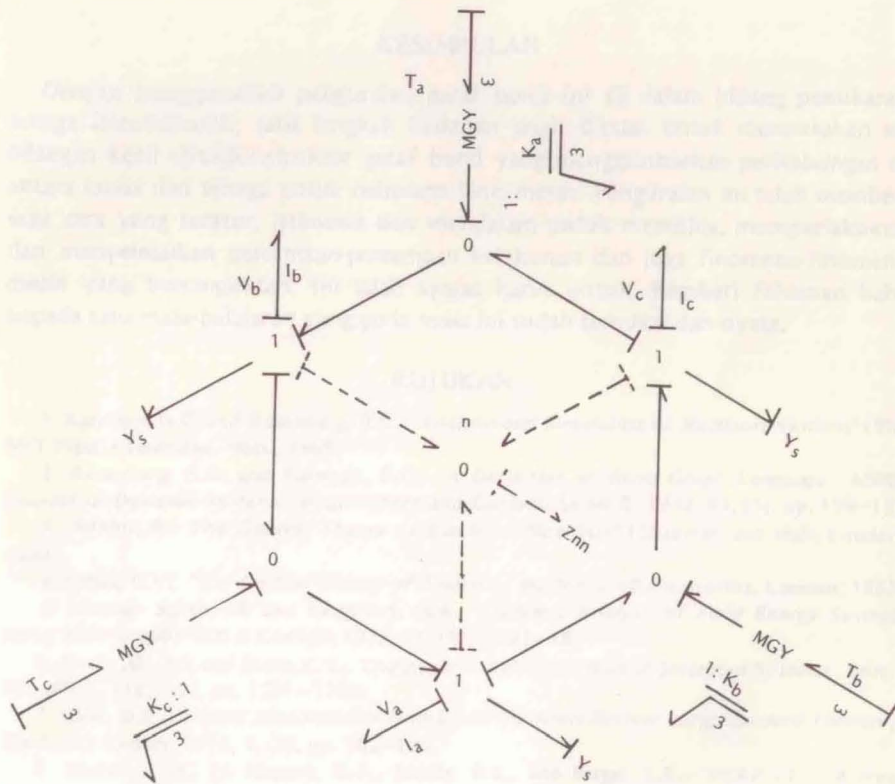
$$l_F = 0.04270 \text{ H} \quad R_F = 0.20 \Omega \text{ at } 75^\circ\text{C}$$

$$l_D = l_Q = 0.0866 \text{ H} \quad R_D = R_Q = 1.28 \Omega \text{ at } 75^\circ\text{C}$$

Bilangan lilitan angker yang berkesan untuk satu fasa = 364

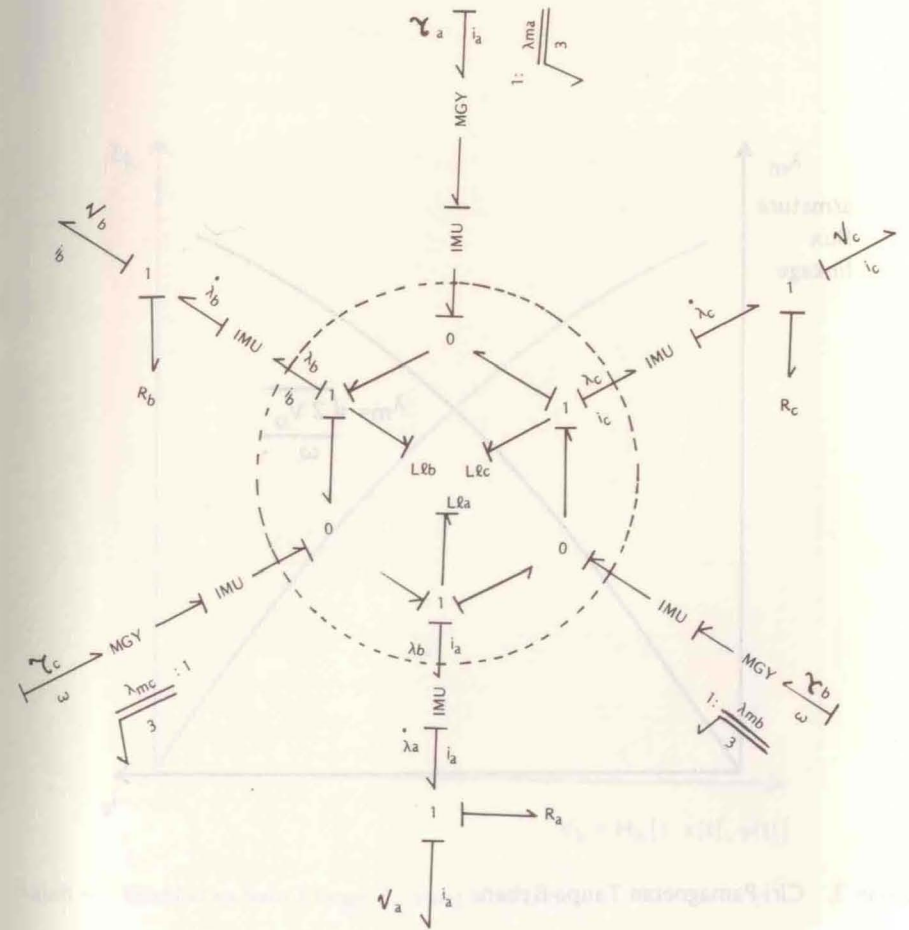
Bilangan lilitan medan yang berkesan untuk satu kutub = $52\frac{1}{2}$

Bilangan lilitan pelambab yang berkesan untuk satu kutub = 8



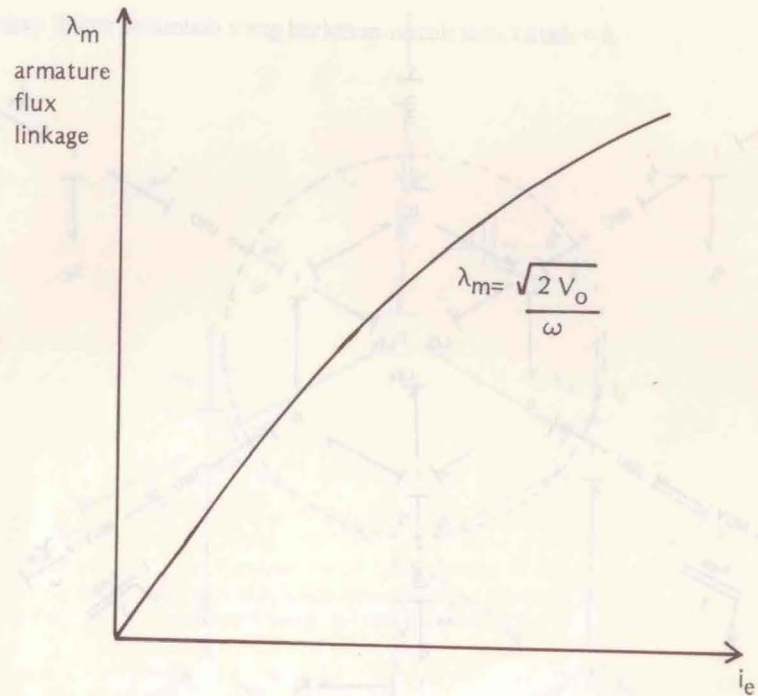
Rajah 1. Geraf Bond Keadaan Tetap untuk Janakuasa Segerak Tiga Fasa.

Figure 1. Steady-State Bond Graph of Three-Phase Synchronous Generator.



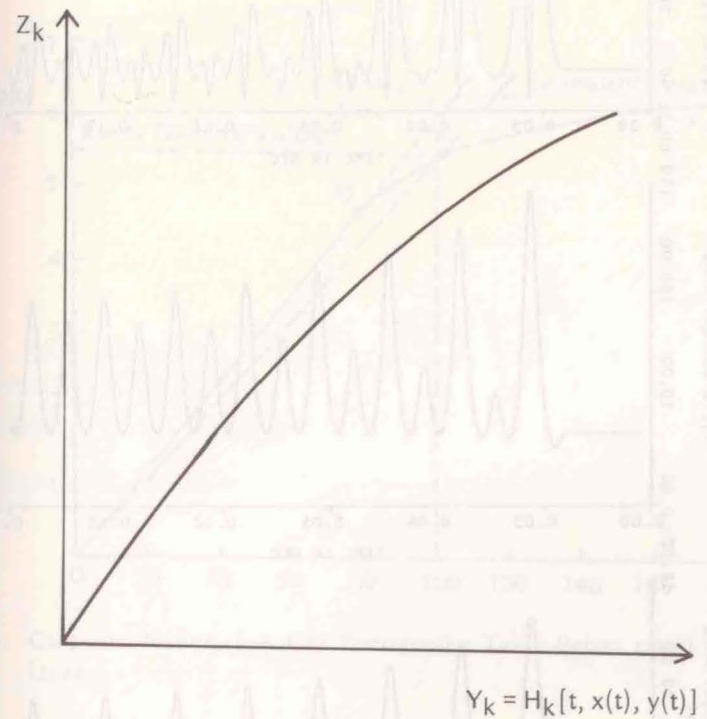
Rajah 2. Geraf Bond Dinamik untuk Janakuasa Segerak Tiga Fasa.

Figure 2. Dynamic Bond Graph of Three-Phase Synchronous Generator



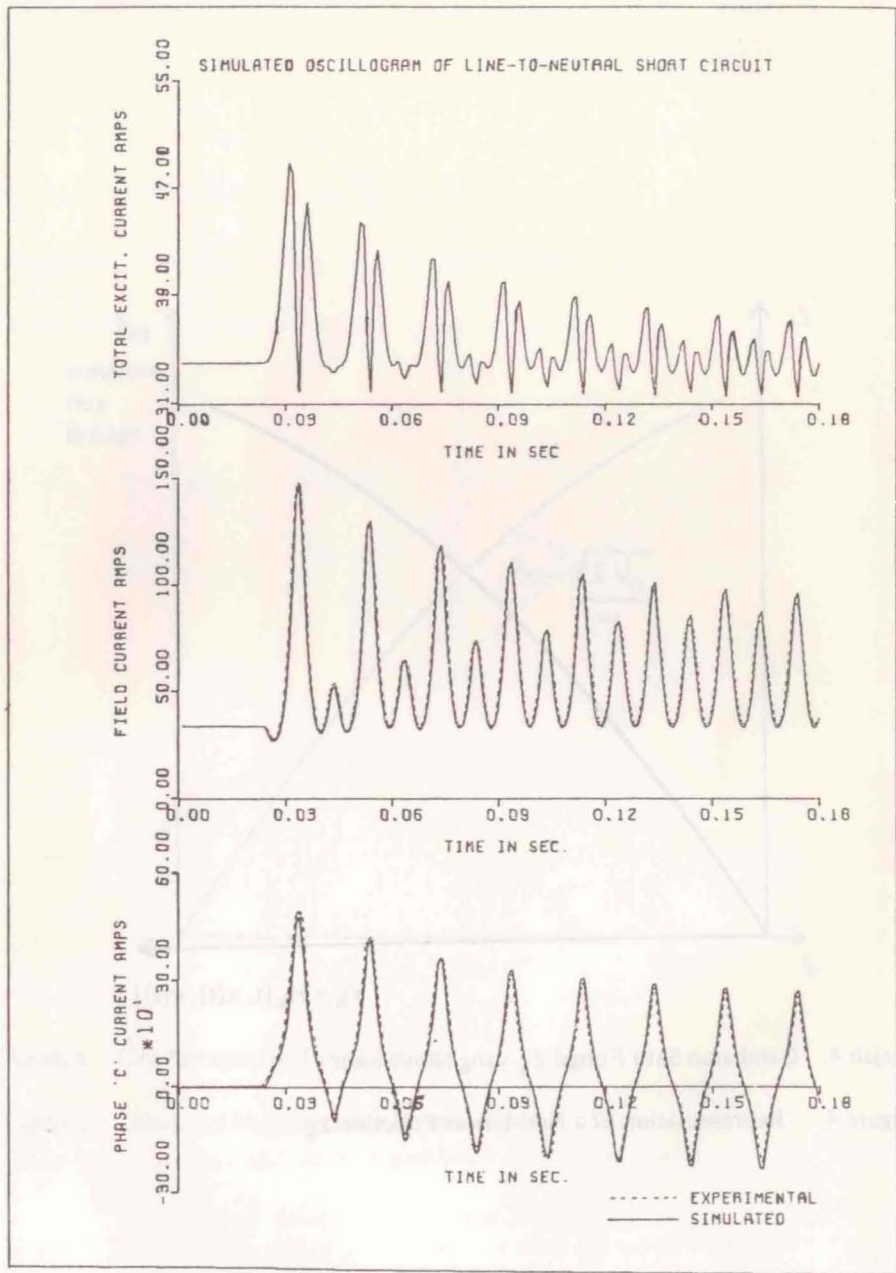
Rajah 3. Ciri Pamagnetan Tanpa-Beban.

Figure 3. No-Load Magnetization Characteristic.



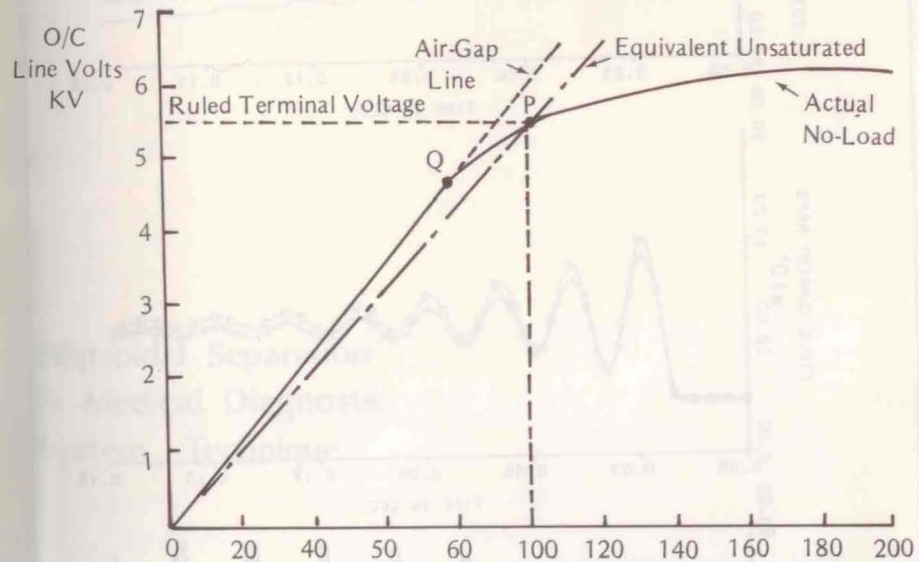
Rajah 4. Gambaran Satu Fungsi Z_k yang Non-Linear

Figure 4. Representation of a Non-Linear Function Z_k



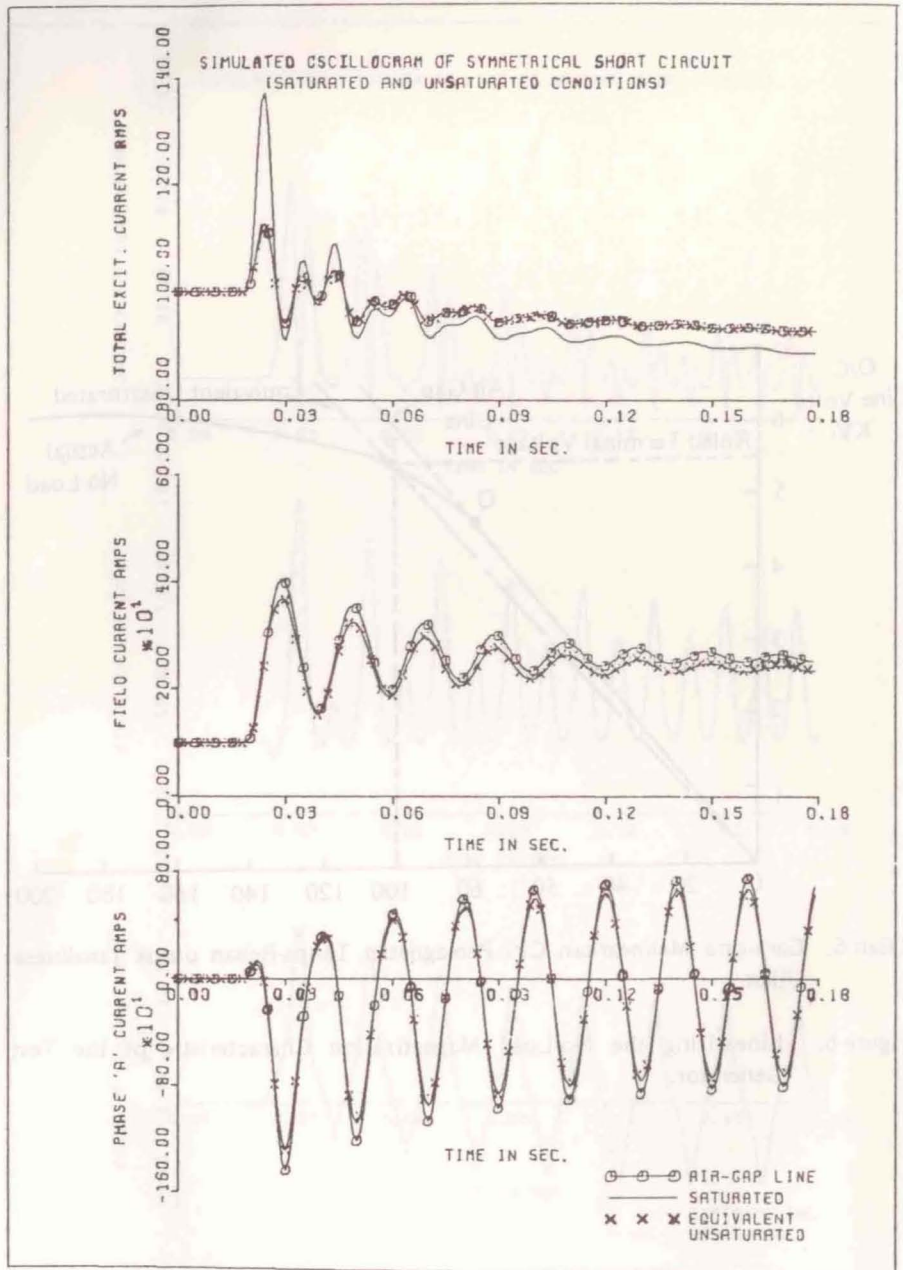
Rajah 5. Arus Litar-Pintas Talian-ke-Nutral untuk Janakuasa Segera.

Figure 5. Line-to-Neutral Short-Circuit Currents for the Synchronous Generator.



Rajah 6. Cara-cara Melinearkan Ciri Pemagnetan Tanpa-Beban untuk Janakuasa Ujian.

Figure 6. Linearizing the No-Load Magnetization Characteristic of the Test Generator.



Rajah 7. Kesan-kesan Ciri Pemagnetan yang Linear di atas Arus Litar-Pintas Semukor.

Figure 7. Effects of Linearizing the Magnetization Characteristic on Symmetrical s/c Currents.