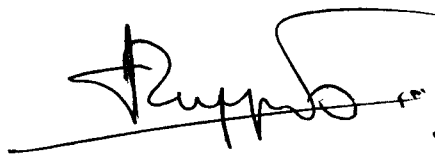


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Este exemplar corresponde à redação final
da tese defendida por Carlos Henrique Santos
Sales e aprovada pela Comissão Julgadora
em 27/04/1984.



UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DE SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM CARGAS
E PARÂMETROS VARIÁVEIS COM A
FREQUÊNCIA

CARLOS HENRIQUE SANTOS SALES

Orientador: ERNESTO RUPPERT FILHO

011

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia da Universidade Esta-
dual de Campinas - UNICAMP - co-
mo parte dos requisitos exigi-
dos para obtenção do título de
MESTRE EM CIÊNCIAS.

JANEIRO 1984

A meus pais
e a
Maria Helena e
nossos filhos

AGRADECIMENTOS

- ... a Ernesto Ruppert Filho, pela excelente orientação e apoio;
- ... aos amigos Akebo, Francisca, Castro, Dilson, Álvaro, Basílio, Tadeu e Gervásio, pela alegre e inteligente convivência na FEC;
- ... ao Prof. Flávio Camargo, pela cessão de valiosa bibliografia;
- ... à Maria Júlia, pela excelente datilografia;
- ... à Maria Helena, pelo incentivo, apoio, paciência e amor.

RESUMO

Este trabalho apresenta um sumário sobre modelagem clássica de cargas determinísticas em sistemas elétricos de potência.

Desenvolve-se uma nova modelagem que possibilita estudar dinâmica de sistemas elétricos de potência, considerando a variações dos parâmetros da rede elétrica bem como das cargas (representadas por modelo de admitância para a terra) com as velocidades angulares das tensões em todas as barras, com ou sem geração.

Na solução alternada das equações diferenciais e algébricas que constituem o modelo matemático do sistema, as velocidades angulares das tensões nas barras são calculadas, a cada passo de integração das equações diferenciais, e utilizadas para recalcular os parâmetros da rede elétrica e das cargas num processo de ajuste estado das barras-parâmetros. Utiliza-se o método trapezoidal na solução das equações diferenciais.

Os resultados, obtidos em dois sistemas exemplos, se referem a estudos de estabilidade transitória de curta duração e são comparados com resultados correspondentes obtidos usando o modelo clássico de estudo de estabilidade transitória de curta duração.

ABSTRACT

This work presents a summary on deterministic load classical modelling in electrical power systems.

To study electrical power systems dynamics a new modelling is presented regarding the effects of changing the network parameters and loads (represented by shunt admittances) with voltage frequencies of all generation and non-generation busses.

In the alternating solution of the differential and algebraic equations representing power system, bus voltage frequencies are evaluated at each differential equations integration step and used to re-evaluate the network parameters and loads in an adjusting bus state-parameters process. The trapezoidal method is used to solve the differential equations.

Results for two different electrical sample systems related to short-term transient stability are compared to equivalent results using short-term transient stability classical model.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - MODELAMENTO DE CARGAS E ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA	1
I.1 - INTRODUÇÃO	2
I.2 - CARGAS - CONCEITUAÇÃO	4
I.2.1 - Natureza e características das Cargas	5
I.2.2 - Representação estática de cargas concentradas para estudos do s.e.p. em regime permanente	7
I.3 - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA ..	13
I.4 - MODELAMENTO DE CARGAS EM ESTUDO DE ESTABILIDADE	14
I.5 - CARGAS VARIÁVEIS COM A FREQUÊNCIA ...	19
I.6 - APRESENTAÇÃO DA TESE	21
 CAPÍTULO II - DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE ANGULARES INSTANTÂNEAS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA	24
II.1 - INTRODUÇÃO	25
II.2 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR INSTANTÂNEA DAS TENSÕES DAS BARRAS DE CARGA	25
II.3 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR INSTANTÂNEA UTILIZADA NO CÁLCULO DAS ADMITÂNCIAS SÉRIE DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	34
 CAPÍTULO III - MODELO MATEMÁTICO DE ADMITÂNCIAS VARIÁVEIS COM A FREQUÊNCIA	40
III.1 - INTRODUÇÃO	41
III.2 - ADMITÂNCIAS VARIÁVEIS COM A FREQUÊNCIA	42

III.3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CARAC <u>TERÍSTICOS</u> DE ADMITÂNCIAS SHUNT ..	43
III.4 - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES CA <u>RACTERÍSTICOS</u> DE ADMITÂNCIAS SÉRIE	46
III.5 - CARGA REPRESENTADA POR ADMITÂNCIA VARIÁVEL COM A FREQUÊNCIA	48
III.6 - MODELO DE MATRIZ ADMITÂNCIA DE BAR <u>RAS</u> VARIÁVEL COM A FREQUÊNCIA	49
III.7 - CARGAS COMO IMPEDÂNCIAS	51
III.8 - VELOCIDADE ANGULAR INSTANTÂNEA CO <u>MO</u> VARIÁVEL DE ESTADO DE BARRA ...	52
III.9 - ALGORÍTMO	55
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E COMENTÁRIOS	57
IV.1 - COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS OBTI <u>DOS</u>	58
IV.2 - CONCLUSÕES	76
IV.3 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS ...	77
BIBLIOGRAFIA	78
APÊNDICE	81

CAPÍTULO I

MODELAMENTO DE CARGAS E ESTUDO DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

I.1. INTRODUÇÃO

Desde que a Westinghouse produziu o primeiro grande programa de estabilidade em 1935, consideráveis refinamentos foram acrescentados às técnicas de análise transitória de sistemas elétricos de potência (s.e.p.).

Como exemplos, pode-se citar o desenvolvimento da matriz admitância de barras e o aperfeiçoamento de algoritmos que tornaram a simulação para estudos de estabilidade transitória, um processo de solução simultânea de dois tipos de equações: a integração das equações diferenciais que representam as máquinas elétricas (normalmente geradores), as excitatrizes e os controles, e a resolução das equações algébricas que descrevem a rede elétrica externa e que acopla os geradores.

Paralelamente, inúmeros detalhes foram acrescentados aos modelos dos componentes dos sistemas de potência. Pelo menos cinco modelos dinâmicos de geradores foram desenvolvidos para estudos de estabilidade, os quais variam em complexidade desde duas, no caso do modelo clássico, a seis equações de estado, quando e feitos transitórios e subtransitórios são levados em conta nos eixos diretos e em quadratura.

Além dos modelos de geradores, quatro tipos padrões de sistemas excitadores-reguladores de tensão foram desenvolvidos pelo I.E.E.E., bem como um modelo de uso geral para os sistemas turbina-controle de velocidade [1].

Os sistemas de transmissão e distribuição por serem vistos como circuitos passivos lineares, são modelados como tal.

A representação de cargas, entretanto, em estudos típicos de estabilidade, está limitada aos modelos estáticos: representação por MVA constante, corrente constante, impedância constante ou combinação desses modelos. Em alguns casos, as cargas são motores síncronos e/ou indução e então são modelados pelas equações diferenciais que os representam.

O pouco desenvolvimento dos modelos de carga em estudos de estabilidade deveu-se às seguintes causas:

1. O efeito das cargas era considerado secundário.
2. Os melhoramentos dos modelos introduzem dificuldades matemáticas que podem aumentar drásticamente os tempos de simulação. Estudos mostram que incluir, por exemplo, modelos de corrente e/ou potência constante, aumentam significativamente o tempo de simulação e que, em alguns casos, não se tem convergência na solução numérica das equações algébricas de fluxo de carga.
3. É difícil estimar-se as características das cargas de um sistema elétrico de potência em um determinado instante, ou mesmo em um determinado período.

Recentemente tem-se dado ênfase à representação das cargas como função da tensão e da frequência. Essa preocupação deve-se às seguintes razões [2]:

1. Há uma tendência em se melhorar a precisão quantitava dos resultados obtidos em simulação de s.e.p.
2. O uso universal de computadores digitais permite representações mais refinadas de todos os componentes dos sistemas.
3. A representação dos controles permite obter bons resultados. Essa representação é essencial para avaliar a contribuição de todos os elementos (inclusive cargas) no amortecimento dos sistemas.
4. O estudo dos grandes sistemas interligados exige consistência entre as representações dos diversos componentes dos s.e.p.

Neles as cargas estão ligadas nos mais diferentes pontos, na sua maioria sujeitos a diferentes frequências nas situações de perturbação.

Assim, os modelos de carga que levam em conta as variações da frequência trazem uma dificuldade adicional: a determinação das velocidades angulares das tensões das barras onde as cargas estão conectadas.

Neste capítulo discute-se a conceituação, as dificuldades do conhecimento da natureza, a composição e por fim as representações estáticas de cargas em s.e.p.

Discute-se ainda o efeito dos modelamentos de cargas em estudos de estabilidade, apresenta-se alguns modelos de cargas dependentes da frequência, e também os objetivos da tese.

I.2. CARGAS - CONCEITUAÇÃO

Em análise de sistemas elétricos da potência, o termo *carga* não tem definição técnica precisa. Dependendo do contexto ele pode significar, isoladamente ou em combinação, corrente, potência ou impedância.

Em geral, entretanto, o termo refere-se a equipamentos ou a conjuntos de equipamentos que consomem energia elétrica de um sistema, transformando-a em outras formas de energia: mecânica, luminosa, térmica, etc.

A abordagem de cargas segundo *tipos de transformação de energia* é uma impossibilidade qualitativa e quantitativa. Deve-se lembrar que um só equipamento transforma energia elétrica em uma combinação de várias outras formas de energia e em taxas dificilmente determináveis.

Como consequência, na literatura é comum encontrar - se *cargas* como equipamentos, ou conjuntos de equipamentos, que retiram energia elétrica de um dado s.e.p., sem a preocupação de se saber como e em que taxas de outros tipos de energia ela será convertida.

A Tabela I mostra porcentagens de vários tipos de equipamentos em s.e.p. típicos.

As cargas podem ser vistas ainda como grandes blocos consumidores de energia elétrica (demanda de energia elétrica de regiões geográficas, de grandes concentrações urbanas e/ou industrial).

Equipamento	Referência - %					
	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	
Motores de indução	60	48	60	50	60	50
Motores síncronos	20	10	10	10	10	25
Conversores síncronos						
Iluminação		25	20		25	25
Aquecimento						
Perdas		7				
Diversos	20	10		40		

Tabela I - Porcentagens aproximadas de equipamentos em sistemas elétricos de potência

Como conclusão, pode-se dizer que o conceito de cargas é extremamente variável e flexível, podendo ser empregado tanto para uma lâmpada incandescente de poucos watts, como para um motor elétrico de centenas ou milhares de CV, a um complexo industrial, ou ainda a um sistema elétrico de potência completo (que pode, por sua vez, ser considerado apenas como uma carga de um outro sistema maior).

I.2.1 - Natureza e características das Cargas

A divisão apresentada na Tabela I não é rígida. As cargas em um s.e.p. variam durante o dia, de uma estação para outra, de um local para outro.

Uma área de concentração industrial, por exemplo, tem sua carga constituída principalmente por motores de indução com um ciclo de funcionamento bem determinado. Já uma região tipicamente residencial tem sua carga consideravelmente constituída por aparelhos elétricos monofásicos operados aleatoriamente pelas donas de casa.

Esse aspecto aleatório torna difícil o conhecimento preciso da natureza da carga.

Mesmo que em um determinado instante a natureza exata das cargas de um sistema pudesse ser determinada, as características dos equipamentos conectados não poderiam ser corretamente avaliadas.

Tome-se como exemplo o caso dos motores de indução. Suponha-se que se queira determinar a característica do motor de indução equivalente em uma barra. A construção desse modelo seria muito trabalhosa, senão impossível, pelas seguintes razões [8,9]:

1. Os motores estariam espalhados nos circuitos de distribuição de energia do sistema, em diversos níveis de tensões e separados por linhas e transformadores de diferentes impedâncias.
2. Haveria grandes diferenças entre os seus parâmetros elétricos e mecânicos.
3. Não seria correto assumir-se que todos os motores estariam igualmente carregados. As suas características reais de potências ativa e reativa dependem, de maneira não linear, desses fatores.
4. Mesmo dois motores originalmente idênticos e construídos para acionarem cargas similares, podem mostrar características diferentes por causa de problemas de fabricação e de envelhecimento.
5. A energia elétrica que alimenta um determinado motor poderia não provir de uma única barra.

Todas essas dificuldades são extensíveis aos outros equipamentos ligados à rede elétrica do sistema.

Admitindo-se a hipótese extrema de que a natureza e as características dos elementos fossem conhecidos, seriam milhares de diferentes tipos de equipamentos ligados em uma barra.

Ainda que se admitisse características simplificadas, as equações não teriam formas matemáticas similares. A elaboração de uma expressão que sintetizasse o modelo da carga ligada à barra

ra, exigiria um tratamento matemático complexo, comprometendo a confiabilidade e manuseabilidade dos resultados obtidos.

As cargas são então vistas como um todo em um sistema (ou em partes dele) e tratadas como solicitações de potências ativa e reativa nas barras. Quando abordadas dessa maneira, as cargas são ditas *concentradas* ou *agregadas*.

Basicamente os modos usuais de representações das características de cargas concentradas são os seguintes:

1. Atribuições de características estáticas, isoladas ou em combinação, de potência, corrente e impedância constantes.
2. Levantamento das características estáticas, por meio de medidas, das variações das potências ativa e reativa das cargas quando a tensão e/ou a frequência do sistema são variadas.
3. Combinação desses dois métodos.
4. Outras maneiras [10], de uso não consagrado.

A seguir são apresentadas as formulações estáticas de carga.

I.2.2 - Representação estática de cargas concentradas para estudos do s.e.p. em regime permanente

Os três tipos de representações estáticas de cargas concentradas são baseados nas seguintes suposições:

1. A tensão aplicada sobre as cargas não é constante (cargas como impedância constante).
2. A tensão aplicada sobre as cargas é constante (carga como potência constante).
3. A potência elétrica absorvida pelas cargas é função linear da tensão (cargas como corrente constante).

A seguir discute-se as representações das cargas por impedância constante (Z), potência constante (S) e corrente constante (I).

Cargas como Z constante

A figura I.1 mostra a carga concentrada de uma barra representada equivalentemente por suas potências ativa e reativa absorvidas, por impedância e admitância para a terra.

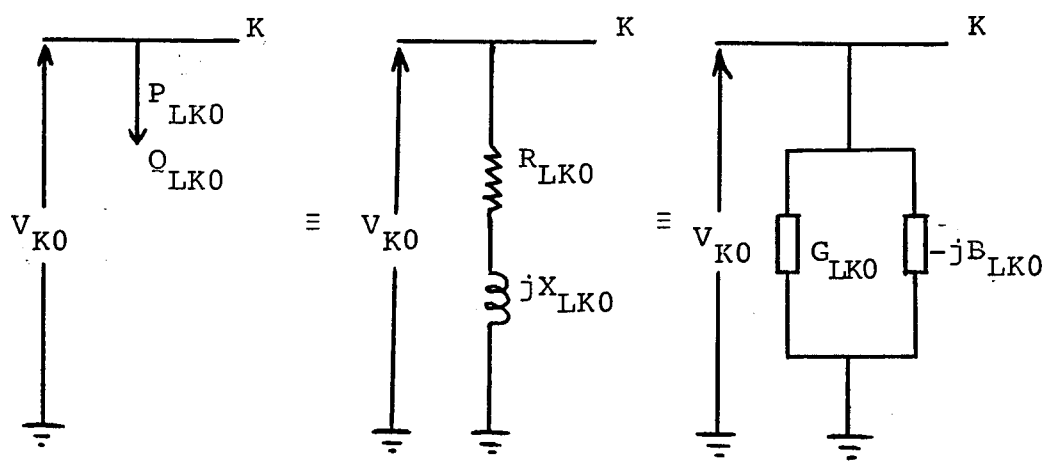


Fig. I.1 - Carga concentrada representada pelas potências elétricas absorvidas (a), por impedância equivalente (b) e por admitância equivalente (c) para a terra.

A impedância Z_{LK0} e a admitância Y_{LK0} para a terra que absorvem fluxos de potências ativa e reativa equivalentes à potência elétrica das cargas concentradas na barra, são dadas por:

$$Z_{LK0} = \frac{|V_{K0}|^2}{P_{LK0} - jQ_{LK0}} = R_{LK0} + jX_{LK0} \quad (I.2.1)$$

ou

$$Y_{LK0} = \frac{1}{|Z_{LK0}|} \cos\phi_{LK0} - j \frac{1}{|Z_{LK0}|} \sin\phi_{LK0} \quad (I.2.2)$$

onde:

0 - índice usado para designar grandezas consideradas em regime permanente - velocidade angular ω_0

V_{K0} - tensão da barra K nas condições de potência ativa e reativa especificadas.

P_{LK0} e Q_{LK0} - respectivamente potências ativa e reativa especificadas da carga.

ϕ_{LK0} - ângulo de impedância Z_{LK0}

Quando a carga concentrada da barra for matematicamente tratada por meio da impedância Z_{LK0} , ou por meio da admitância Y_{LK0} , ela é definida como *impedância constante* ou como *admitância constante*, respectivamente.

Nesse caso, se a tensão da barra não for constante, tem-se aplicado sobre a impedância Z_{LK0} , ou sobre a admitância Y_{LK0} , uma tensão V_K , resultando fluxos de potências ativa e reativa que variam com o quadrado do valor da tensão aplicada:

$$S_{LK} = P_{LK} + jQ_{LK} = \frac{|V_K|^2}{Z_{LK0}^*} = |V_K|^2 \frac{1}{R_{LK0} - jX_{LK0}} \quad (I.2.3)$$

$$S_{LK} = P_{LK} + jQ_{LK} = |V_K|^2 Y_{LK0}^* = |V_K|^2 (G_{LK0} + jB_{LK0}) \quad (I.2.4)$$

Quando a carga é definida como impedância constante e se deseja expressá-la em função das potências P_{LK0} e Q_{LK0} , o modelo matemático de carga é:

$$S_{LK} = P_{LK} + jQ_{LK} = \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 (P_{LK0} + jQ_{LK0}) \quad (I.2.5)$$

As equivalências entre (I.2.3), (I.2.4) e (I.2.5) são óbvias.

Cargas como MVA constante

Suponha-se que a tensão V_{K0} da figura I.1 seja constante.

A equação (I.2.5) se reduz à:

$$S_K = P_{LK} + jQ_{LK} = P_{LK0} + jQ_{LK0} \quad (I.2.6)$$

Nesse caso a carga é definida como *potência constante*.

É interessante observar-se que a carga concentrada pode ser representada por uma impedância, ou por uma admitância, para a terra nos modelos de MVA e Z constantes. Definí-la como potência ou impedância constantes, só depende de considerações sobre a tensão aplicada.

Cargas como I constante

Algumas concessionárias norte-americanas de energia elétrica adotam a regra prática de que 1% de variação na tensão acarreta 1% de variação na potência total consumida pelas cargas [11].

O modelo matemático de carga que corresponde a essa regra prática é o de *corrente constante*, isto é, a potência da carga varia linearmente com a tensão:

$$S_{LK} = \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right) (P_{LK0} + jQ_{LK0}) \quad (I.2.7)$$

Em termos de R_{LK0} e X_{LK0} da figura I.1, a equação (I.2.7) é escrita como:

$$S_{LK} = |V_K| |V_{K0}| (G_{LK0} + jB_{LK0}) \quad (I.2.8)$$

Quando há interesse, a corrente constante I_{LK0} que representa a carga é dada por:

$$I_{LK0} = \frac{P_{LK0} - jQ_{LK0}}{V_{K0}^*} \quad (I.2.9)$$

Desde que a regulação da tensão na carga seja pequena, há pouca diferença entre os modelos de I e MVA constantes. A porcentagem da diferença é proporcional à porcentagem da regulação

da tensão [7]:

Seja S_1 , com o modelo de MVA constante,

$$S_1 = S_{LK0}$$

e seja S_2 , com o modelo de I constante:

$$S_2 = S_{LK0} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)$$

$$\text{Reg} = (|V_K|/|V_{K0}| - 1)$$

$$\Delta S_{LK} = S_1 - S_2 = S_{LK0} (|V_K|/|V_{K0}| - 1) = S_{LK0} \cdot \text{Reg}$$

O modelo de corrente constante, para pequenas variações de tensão, serve como um indicador da regulação do sistema.

Em relação ao modelo de Z constante, se $|V_K| \approx |V_{K0}|$, a expressão (I.2.8) pode ser considerada igual a (I.2.4).

Como conclusão, pode-se verificar que para variações moderadas da tensão, é praticamente indiferente a escolha dos modelos estáticos de carga analisados.

Representações combinadas de Z, S e I constantes

Duas representações que usam combinações dos modelos anteriores são os modelos polinomial e exponencial de cargas.

O modelo polinomial é constituído pelas expressões:

$$P_{LK} = P_{LK0} \left[A_{PK} + B_{PK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right) + C_{PK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 \right]$$

$$Q_{LK} = Q_{LK0} \left[A_{qK} + B_{qK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right) + C_{qK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 \right]$$

As constantes A, B e C são parâmetros determinados em pírca ou teoricamente, e são conhecidos como fatores de combinação da carga. Quando todos esses fatores são positivos, eles representam as respectivas frações de MVA, I e Z constantes das potências absorvidas pela carga.

Para que o balanço das potências da carga seja mantido, as seguintes relações devem ser observadas:

$$A_{pK} + B_{pK} + C_{pK} = 1$$

$$A_{qK} + B_{qK} + C_{qK} = 1$$

O modelo exponencial tem a forma:

$$S_{LK} = S_{LK0} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^n$$

A figura abaixo ilustra curvas características do modelo exponencial. As curvas para $n=0$, $n=1$ e $n=2$ identificam de imediato os modelos de MVA, I e Z constantes, respectivamente.

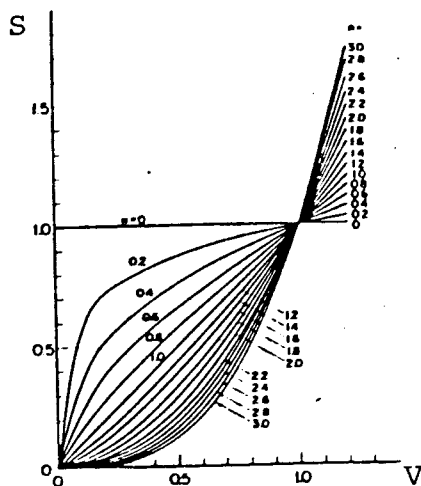


Fig. I.2 - Curvas características do modelo exponencial de cargas [12].

Uma das dificuldades reconhecidas na literatura para a avaliação do comportamento de cargas em s.e.p., é a falta de resultados experimentais publicados.

Concórdia [2], cita que em cem empresas norte-americanas concessionárias de energia elétrica consultadas sobre resultados experimentais de cargas, somente nove enviaram dados confiáveis e cerca de trinta enviaram dados absurdos.

Os resultados experimentais na literatura são disponíveis ordinariamente como:

- Razão entre as variações percentuais da corrente de carga ΔI e tensão ΔV , $(\Delta I/\Delta V)$.
- Razão entre as variações percentuais de potência ativa ΔP , e/ou potência reativa ΔQ , e tensão ΔV , $(\Delta P/\Delta V$ ou $\Delta Q/\Delta V)$.

Os fatores de combinação dos modelos polinomiais e o expoente n do modelo exponencial são calculados a partir das relações $\Delta P/\Delta V$ e $\Delta Q/\Delta V$ [2,4,12,13].

I.3. ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

O estudo de estabilidade transitória proporciona informações relacionadas com a capacidade de um s.e.p. permanecer em sincronismo durante perturbações, tais como perda de geração, perda de elementos de transmissão, variação súbita ou contínua de carga, ou ainda na ocorrência de falhas momentâneas, como curto-circuitos.

Especificamente, esse tipo de estudo informa as variações nas tensões, correntes, potências, ângulos, velocidades angulares e conjugados das máquinas de um s.e.p. Informa ainda as variações das tensões e potências nas barras do sistema, correntes e fluxos de potência nas linhas após uma perturbação.

A análise de estabilidade é um teste de adequação da transmissão de energia de um s.e.p. para um nível desejado de

confiabilidade. Com o objetivo de proporcionar a confiabilidade necessária ao fornecimento contínuo de energia, é preciso que os s.e.p. sejam projetados para serem estáveis em contingências previamente especificadas.

Em estudos de estabilidade transitória, um programa de fluxo de carga é rodado inicialmente para a obtenção das condições do sistema antes da ocorrência da perturbação. Nesse cálculo, a rede elétrica é composta pelas barras do sistema, linhas de transmissão e transformadores. A rede elétrica para estudos de estabilidade, inclui ainda os circuitos elétricos equivalentes das máquinas e os modelos matemáticos de cargas.

Após o cálculo do fluxo de carga, a matriz de impedância, ou admitância, do sistema deve ser modificada para levar em conta as mudanças na representação da rede elétrica devido à falha em consideração.

As características de operação das máquinas síncronas são descritas por um conjunto de equações diferenciais. O número dessas equações necessárias para descrever cada máquina depende dos detalhes que se deseja representar. Duas equações diferenciais simultâneas de primeira ordem são necessárias para a mais simples possível representação de uma máquina síncrona.

A análise de estabilidade transitória é realizada pela solução simultânea das equações algébricas que descrevem a rede elétrica e das equações diferenciais que descrevem as máquinas, em um processo de integração passo a passo.

A solução das equações algébricas da rede elétrica conserva a identidade do s.e.p., acopla os geradores e proporciona as tensões e correntes do sistema durante o período transitório.

Neste trabalho serão usados os conceitos clássicos de análise transitória, tal como apresentado em [3,11,14].

I.4. MODELAMENTO DE CARGAS EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE

Embora os modelos estáticos de carga analisados ante

riormente tenham faixa de validade limitada a no máximo $\pm 20\%$ de variação de tensão [2,7,8,15], é prática extensiva na literatura a utilização desses modelos no estudo da estabilidade transitória.

Apresenta-se, a seguir, o efeito global dessas representações em estudos de estabilidade, as eventuais dificuldades de convergência nas soluções das equações algébricas e por fim o modelamento estático de cargas levando-se em conta o efeito da frequência.

É comum encontrar-se atribuições arbitrárias para os valores dos coeficientes de combinação das cargas.

Em estudos de estabilidade, essa prática pode ser bastante comprometedora, como é ilustrado a seguir.

1. Estudos feitos na Suécia mostraram que usando o modelo de impedância constante para a carga ativa $[P = P_0 (|V|/|V_0|)^2]$ na região norte, seria possível o transporte de cerca de 3650 MW de um grande grupo de geradores localizados no sul do país. Trocando-se o modelo da carga ativa para uma combinação de 50% de MVA e 50% de I constantes $\{P = P_0 [0,5 + 0,5 (|V|/|V_0|)]\}$, o limite de potência que seria possível transmitir foi reduzido para cerca de 200 MW, ou seja, para 5,5% do valor originalmente calculado [2].

2. Estudos feitos em um sistema hipotético de uma única linha de 500 KV alimentando vários centros de cargas, quando sujeito a testes de estabilidade, mostrou que uma mudança no modelo de corrente constante $[P = P_0 (|V|/|V_0|)]$ para a mesma combinação do caso acima citados, foi suficiente para causar instabilidade no sistema [12].

A figura I.3 ilustra esse efeito. Deve-se observar que há pouca diferença entre os modelos de I e Z constantes.

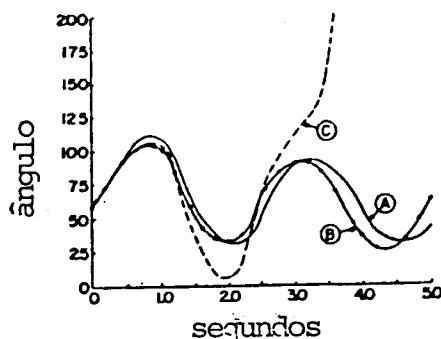


Fig. I.3 - Curva de balanço de um gerador remoto, em relação ao centro de inércia do sistema, após um curto e perda de geração. A - todas as cargas como Z constante. B - Todas as cargas como I constante. C - carga ativa como 50% de MVA constante e 50% de I constante, toda carga reativa como I constante [12].

3. Embora seja frequente a idéia de que cargas como MVA constante são sempre danosas à estabilidade, Kimbark [16] apresenta a possibilidade de um contra exemplo. Considere-se a figura I.4 onde se tem um s.e.p. com uma área exportadora de energia e com uma outra área importadora, ambos contendo geração e carga.

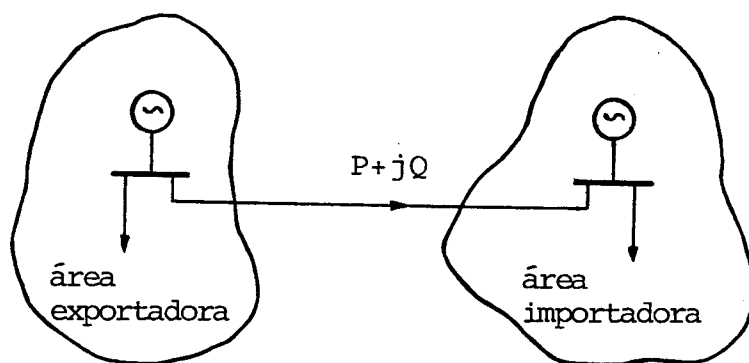


Fig. I.4 - Sistema consistindo de uma área exportadora e outra importadora de energia.

Qualquer perturbação que ameace a estabilidade da interligação das duas áreas, inicialmente causará aceleração nos geradores da área exportadora e desaceleração nos da área importadora. A separação angular dos dois grupos de geradores aumentará e haverá queda de tensão em todo sistema.

Cargas ativas como MVA constante na área exportadora seriam benéficas à estabilidade porque elas tenderiam a manter o carregamento do sistema, enquanto cargas do tipo Z constante, com a potência variando com o quadrado da tensão, ampliariam o efeito da perturbação. Essas mesmas cargas na área importadora causariam efeitos exatamente opostos [16].

Geralmente observa-se o seguinte [2,16]:

- a) Os limites de estabilidade tendem a diminuir quando se muda a representação da carga de Z constante para I constante e por último para MVA constante.
- b) Para áreas interligadas, limites de estabilidade mais baixos podem ser encontrados quando as cargas ativas são representadas por Z constante na área exportadora e por MVA constante na área importadora de energia.

A severidade da representação de MVA constante fica caracterizada na figura I.5, onde se pode ver que quando a tensão diminui, a corrente da carga cresce rapidamente.

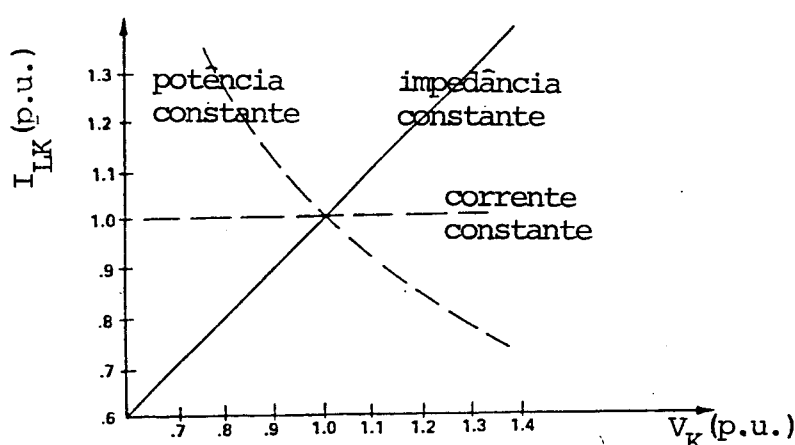


Fig. I.5 - Variação da corrente da carga com a tensão

Quando o modelo da carga envolve MVA constante , total

ou parcialmente, como nos modelos polinomiais, em situações próximas de zero, essa representação torna-se inconveniente por duas razões:

1. As potências ativa e reativa não se anulam, o que não é evidentemente o caso de sistemas reais (figura I.6).

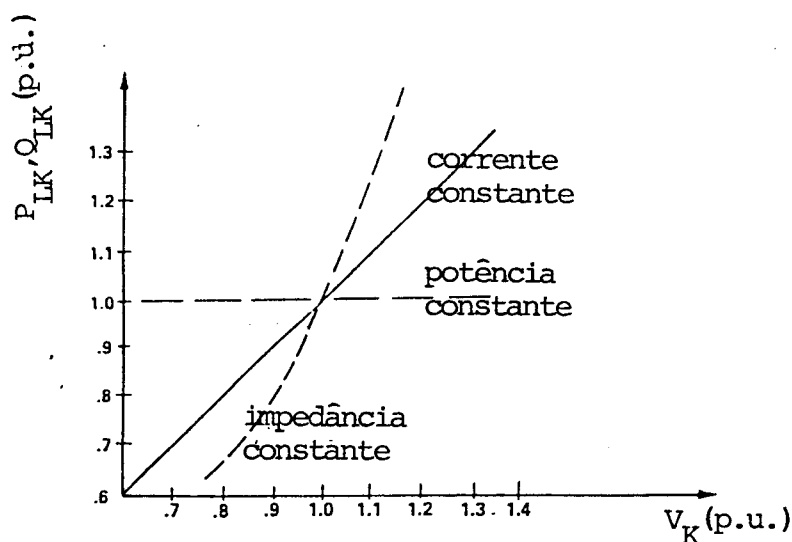


Fig. I.6 - Variação de P_{LK} e Q_{LK} com a tensão

2. A corrente de carga tende para o infinito.

Nessa situação, a convergência numérica das equações algébricas é dificultada, independentemente do método numérico utilizado (Newton ou Gauss-Seidel), [17].

O modelo de I constante, para tensões elevadas, pode apresentar esse mesmo tipo de dificuldade [17].

Para evitar esse problema, propõe-se mudar a representação da carga para um modelo exponencial equivalente [17], ou ainda para o modelo de Z constante quando a tensão atingir valores críticos previamente estipulados, restaurando a representação original quando a tensão voltar a valores aceitáveis [16,17].

Esse procedimento na resolução das equações algébricas do s.e.p., durante o período de falha, concorda inteiramente com as experiências observadas no decorrer deste trabalho.

I.5. CARGAS VARIÁVEIS COM A FREQUÊNCIA

Todos os modelos de carga comentados são ordinariamente supostos como tendo fator de potência constante, isto é, suas potências ativas e reativas variam da mesma maneira em relação às flutuações de tensão.

Entretanto, só se pode falar de potência, corrente e impedância constantes, se a frequência do sistema for considerada constante, pois do contrário haverá variações nos parâmetros do circuito equivalente que representa a carga.

Quando o efeito da frequência é levado em conta, a expressão da potência da carga tem a seguinte forma:

$$P_K = g(|V_K|, f_K)$$

onde f_K é a frequência instantânea da tensão da barra na qual a carga está conectada.

Para cargas concentradas, uma expressão matemática de terminando um comportamento funcional como regra não pode ser determinada analiticamente. O melhor que se pode esperar é estimar, medir ou por algum método empírico encontrar a dependência simultânea da carga com a tensão e com a frequência.

Na realidade, em lugar de regras funcionais, o que se encontra na literatura são critérios de variação simultânea da carga com a tensão e com a frequência. Esses critérios são basicamente os seguintes:

1. Só uma fração da carga varia com a frequência [18]

$$P_K = P_{K0} \left[A_{PK} + B_{PK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right) + C_{PK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 + D_{PK} (1 + E_{PK} \Delta f_K) \right]$$

onde

$$A_{pK} + B_{pK} + C_{pK} + D_{pK} = 1$$

E_{pK} indica a variação em p.u. da carga para a correspondente variação na frequência.

2. Toda a carga varia com a frequência [1,4,18]:

$$P_K = P_{K0} \left[A_{pK} + B_{pK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right) + C_{pK} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 \right] (1 + E_{pK} \Delta f_K)$$

3. Modelo exponencial de carga dependente da frequência [13]:

$$P_K = P_{K0} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^n \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^m$$

O valor de m indica o grau de dependência do modelo com a frequência.

Os modelos de carga variáveis com a frequência, além da determinação dos fatores de combinação, têm a dificuldade da determinação das frequências instantâneas das barras nas quais as cargas estão conectadas.

A propagação da variação da frequência em um s.e.p. su jeito a perturbações, é descrita por uma expressão matemática mui to complexa [4]. O caráter da equalização da frequência e a sua variação ao longo do sistema, após uma perturbação, depende prin cipalmente dos parâmetros dos elementos do sistema [4].

Na literatura encontram-se diversos critérios e expres sões para a equalização das frequências transitórias:

- Pela média aritmética das velocidades angulares dos geradores [19]:

$$\underline{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n}$$

onde $\underline{\omega}$ é frequência equalizada em p.u.

- Pela média ponderada das velocidades angulares ω_i , usando-se como pesos as constantes de inércia H_i dos geradores [20]:

$$\underline{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i H_i}{\sum_{i=1}^n H_i}$$

- Pelo uso de expressões originárias de experiências particulares de operação de s.e.p. [21]:

$$\underline{\omega} = \frac{1}{s} \frac{PG - PD_0 [1 + K(\underline{\omega} - \omega_0)]}{2H \cdot PN \cdot \underline{\omega}}$$

onde:

s - operador de Laplace

PG - potência total gerada pelo s.e.p.

PD₀ - demanda total de regime permanente

PN - potência nominal de geração do s.e.p.

K - característica demanda/frequência em p.u./Hz

H - constante de inércia média do sistema

É evidente que a equalização dos valores de ω_K é apenas uma aproximação.

I.6. APRESENTAÇÃO DA TESE

Os modelos de carga que levam em conta as variações simultâneas da tensão e da frequência, trazem uma dificuldade adicional: a determinação das velocidades angulares instantâneas das barras onde as cargas estão conectadas.

Normalmente os estudos de estabilidade transitória in

formam, além de tensões e ângulos do s.e.p., as velocidades angulares dos geradores durante uma perturbação. Entretanto, as cargas, na sua maioria, estão ligadas nos mais diversos pontos do sistema e sujeitas à influência de diferentes frequências transitórias.

Portanto, quando se deseja de fato considerar o efeito das frequências transitórias nas cargas de um s.e.p. sujeito a perturbação, deve-se ser capaz de estimar o valor das velocidades angulares instantâneas nos locais em que se considera as cargas ligadas.

De um modo geral, entretanto, a literatura é omissa em relação à determinação das velocidades angulares instantâneas das barras sem geradores de um s.e.p. em situação de perturbação.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um algoritmo computacional que permita estudar o comportamento dinâmico dos s.e.p., considerando-se as variações efetivas das velocidades angulares instantâneas de todas as barras, com ou sem geração, no cálculo dos parâmetros da rede elétrica e das cargas.

Para tanto, o estudo restringe-se à estabilidade transitória de curta duração, onde os geradores são representados por uma fonte de tensão em série com uma reatância transitória. Os sistemas de excitação, de acionamento e de regulação de velocidade são desprezados.

Quanto à carga, considerando-se a natureza teórica do estudo, e à vista da imprecisão da sua natureza, do desconhecimento de sua composição, da indeterminação dos seus fatores de combinação, dos eventuais problemas de convergência numérica nas equações algébricas introduzidas pelos modelos de potência e corrente constantes, optou-se pelo modelo de admitância.

As admitâncias da rede elétrica e as admitâncias que representam as cargas, são recalculadas em um processo iterativo, a cada passo de integração das equações de balanço dos geradores, para refletirem as variações das frequências transitórias do s.e.p.

A determinação das velocidades angulares das tensões nas barras sem geradores é feita no Capítulo II. Ainda nesse capítulo

desenvolve-se um modelo de velocidade angular instantânea para ser usado no cálculo das admitâncias séries de linhas que ligam barras de frequências diferentes.

No Capítulo III, as admitâncias série e shunts da rede elétrica, inclusive as cargas, recebem tratamento matemático comum, permitindo o desenvolvimento de um modelo de matriz admitâncias de barras que tem a mesma estrutura que o modelo de regime permanente. Apresenta-se o algoritmo desenvolvido.

No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido na tese. Esses resultados são comparados com os resultados do modelo clássico de estudo de estabilidade transitória, tal como apresentado em [11,14].

As equações de balanço dos geradores são integradas pelo método trapezoidal (passo de 0,01s) e as equações algêbricas de fluxo de carga são calculadas pelo método Gauss-Seidel.

CAPÍTULO II

DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES ANGULARES INSTANTÂNEAS EM
ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

II.1. INTRODUÇÃO

Em estudos de estabilidade de sistemas de potência nos quais se está interessado nos efeitos da variação com a frequência dos parâmetros dos sistemas, inclusive cargas, faz-se necessária a distinção de três tipos de avaliações de velocidades angulares:

1. As das tensões internas dos geradores.
2. As das tensões nas barras sem geração, aqui generalizadas como barras de carga.
3. As utilizadas nos cálculos das admitâncias série das linhas de transmissão do sistema.

As velocidades angulares das tensões internas dos geradores são obtidas diretamente no processo de integração das equações diferenciais de balanço das máquinas.

Neste capítulo apresentam-se técnicas para estimar as duas outras velocidades angulares necessárias. Para tanto, serão utilizadas as equações algébricas que constituem parte do modelo matemático de estudo de análise transitória dos s.e.p.

II.2. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR INSTANTÂNEA DAS TENSÕES DAS BARRAS DE CARGA

Nos processos associados com o movimento do rotor de uma máquina síncrona, distinguem-se:

1. Velocidade mecânica Ω_i - definida como a derivada em relação ao tempo do ângulo geométrico, θ_i , da posição temporal do rotor ($\Omega_i = d\theta_i/dt$).
2. Velocidade elétrica relativa γ_i - definida como a derivada em relação ao tempo do ângulo de carga da máquina, δ_i , medido em relação a uma referência síncrona ω_0 ($\gamma_i = d\delta_i/dt$).

3. Velocidade angular instantânea da tensão interna de cada gerador, ω_i , calculada por:

$$\omega_i = \omega_0 + d\delta_i/dt \quad (\text{II.2.1})$$

A referência síncrona ω_0 corresponde à velocidade de um gerador hipotético de inércia infinita, girando à velocidade síncrona do sistema, e tendo ângulo de fase coincidente com o do gerador de referência da situação de regime permanente antes da perturbação.

As velocidades mecânica Ω_i e a elétrica ω_i estão relacionadas pelo número de pares de pólos, p_i , do gerador:

$$\Omega_i = \frac{1}{p_i} \frac{d\delta_i}{dt}$$

A equação de balanço de cada gerador é normalmente desdobrada em duas equações diferenciais simultâneas de primeira ordem [14]:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_0}{2 H_i} (P_{m_i} - P_{e_i}) \quad (\text{II.2.2})$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_0 \quad (\text{II.2.3})$$

onde:

H_i - constante de inércia de cada gerador.

P_{m_i} - potência mecânica fornecida pela turbina do i -ésimo gerador.

P_{e_i} - potência elétrica de saída do i -ésimo gerador.

A cada passo de integração de (II.2.2), obtém-se a velocidade angular instantânea ω_i da tensão interna de cada gerador. Usando-se esse resultado, a integração de (II.2.3) fornece a posição angular δ_i dos rotores em relação à referência síncrona.

Nas barras de carga, a situação é inversa: os ângulos

δ_K das tensões das barras são atualizados a cada resolução das equações algébricas do sistema, mas não se conhece as velocidades angulares instantâneas ω_K dessas tensões.

As frequências locais nas barras de carga, em estudos de estabilidade, são medidas pelas taxas de variação dos ângulos das tensões dessas barras [23,24].

Sejam $V_K(t)$ e $V_K(t+\Delta t)$ respectivamente as tensões de uma barra de carga fornecidas pelas soluções das equações algébricas nos instantes t e $t+\Delta t$:

$$V_K(t) = |V_K(t)| \angle \delta_K(t)$$

$$V_K(t+\Delta t) = |V_K(t+\Delta t)| \angle \delta_K(t+\Delta t)$$

Pode-se calcular:

$$\Delta \delta_K = \delta_K(t+\Delta t) - \delta_K(t) \quad (\text{II.2.4})$$

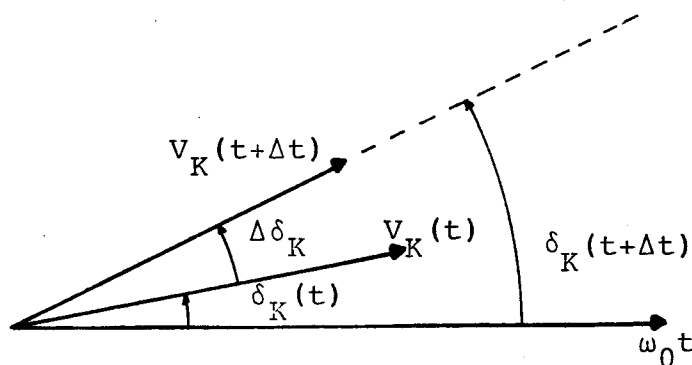


Fig. II.1 - Variação do ângulo $\delta_K(t)$ entre dois instantes consecutivos utilizados na resolução numérica das equações diferenciais do sistema.

Para incrementos pequenos de tempo Δt , utilizados no passo de integração das equações de balanço dos geradores, pode-se escrever:

$$\frac{d\delta_K}{dt} \approx \frac{\Delta \delta_K}{\Delta t} = \frac{\delta_K(t+\Delta t) - \delta_K(t)}{(t+\Delta t) - t} = \gamma_K \quad (\text{II.2.5})$$

A velocidade angular instantânea da barra será:

$$\omega_K = \gamma_K + \omega_0 = \frac{\Delta\delta_K}{\Delta t} + \omega_0 \quad (\text{II.2.6})$$

Esse resultado permite determinar, passo a passo, a velocidade angular instantânea das tensões nas barras de carga, a partir dos valores dos ângulos das tensões obtidos nas soluções das equações algébricas do sistema.

O valor de Δt é o mesmo utilizado para a integração das equações de balanço das máquinas.

As figuras II.2 a II.5 mostram as velocidades angulares das tensões nas barras do sistema II (Apêndice), quando um curto trifásico de 0,09s de duração ocorre na linha 3, próximo à barra 7. O curto é extinto pela abertura definitiva da linha.

A figura II.2 mostra as velocidades angulares ω_i dos geradores do sistema obtidas pela integração das equações diferenciais de balanço das máquinas, desprezando-se o efeito causado pela diferença angular entre os rotores das outras máquinas.

A figura II.3 mostra ω_K das barras 1, 2, 3, calculadas por (II.2.6). Comparando-se as curvas da figura II.3 com as da figura II.2, vê-se que elas são semelhantes, com os valores de ω_K das barras 1, 2, 3 ligeiramente mais próximas entre si.

A figura II.4 mostra, por sua vez, as velocidades ω_K das barras 4 e 6. A figura II.5 mostra ω_K das barras 5 e 6. Com a perda da linha 3, a barra 5 ficou ligada somente à barra 4 e ambas têm a mesma velocidade angular, como pode ser visto pelas curvas.

ω_6 sob maior influência do resto do sistema, acompanha levemente a dinâmica do gerador 3, mas também sem afastar-se da influência do gerador 1.

A figura II.6 mostra ω_7 e ω_9 sob forte influência dos geradores mais próximos, enquanto ω_8 assume um valor intermediário, embora acompanhe mais de perto a dinâmica do gerador 2, de maior inércia.

Pelos resultados comentados, as equações (II.2.5) e (II.

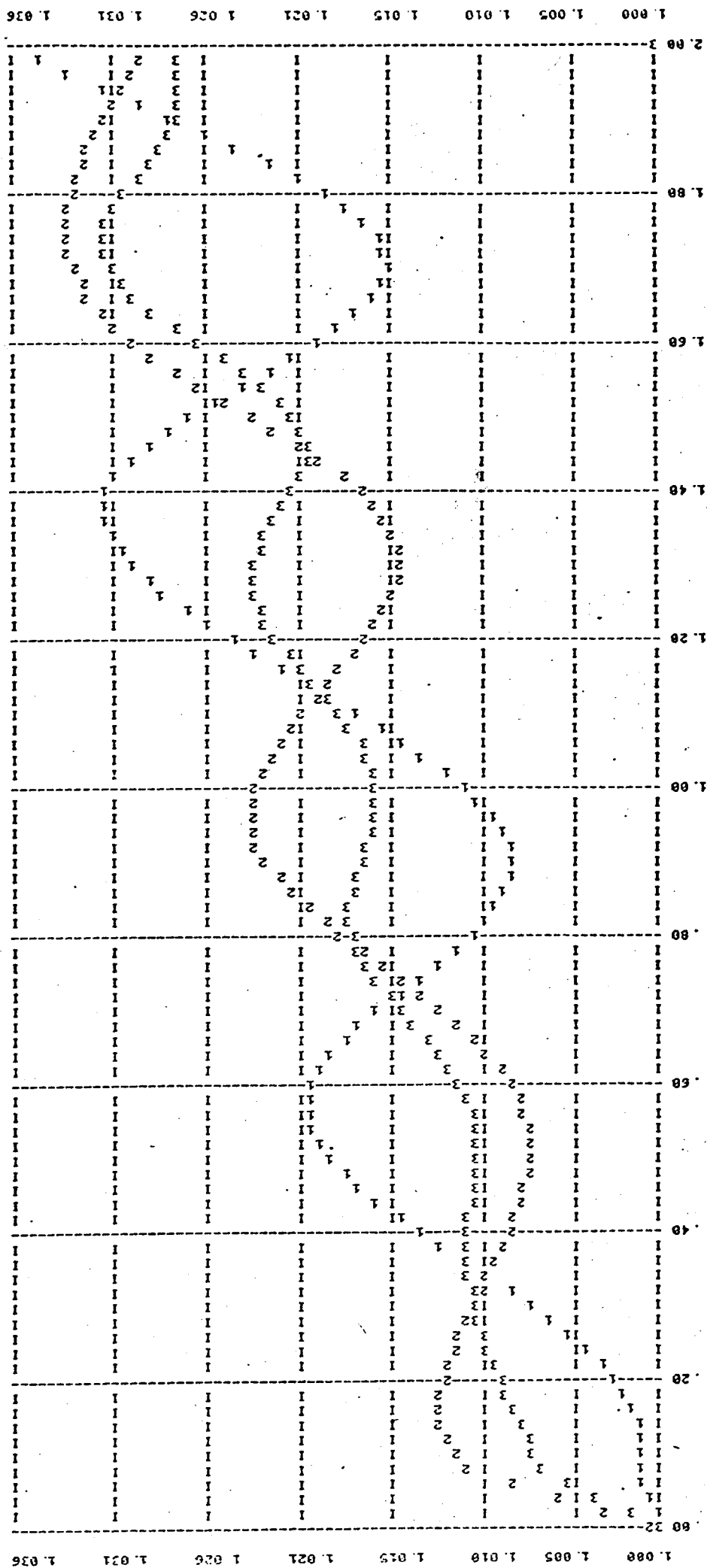


Fig. II.2 .. Velocidades angulares ω_1 , ω_2 , ω_3 dos geradores do sistema II

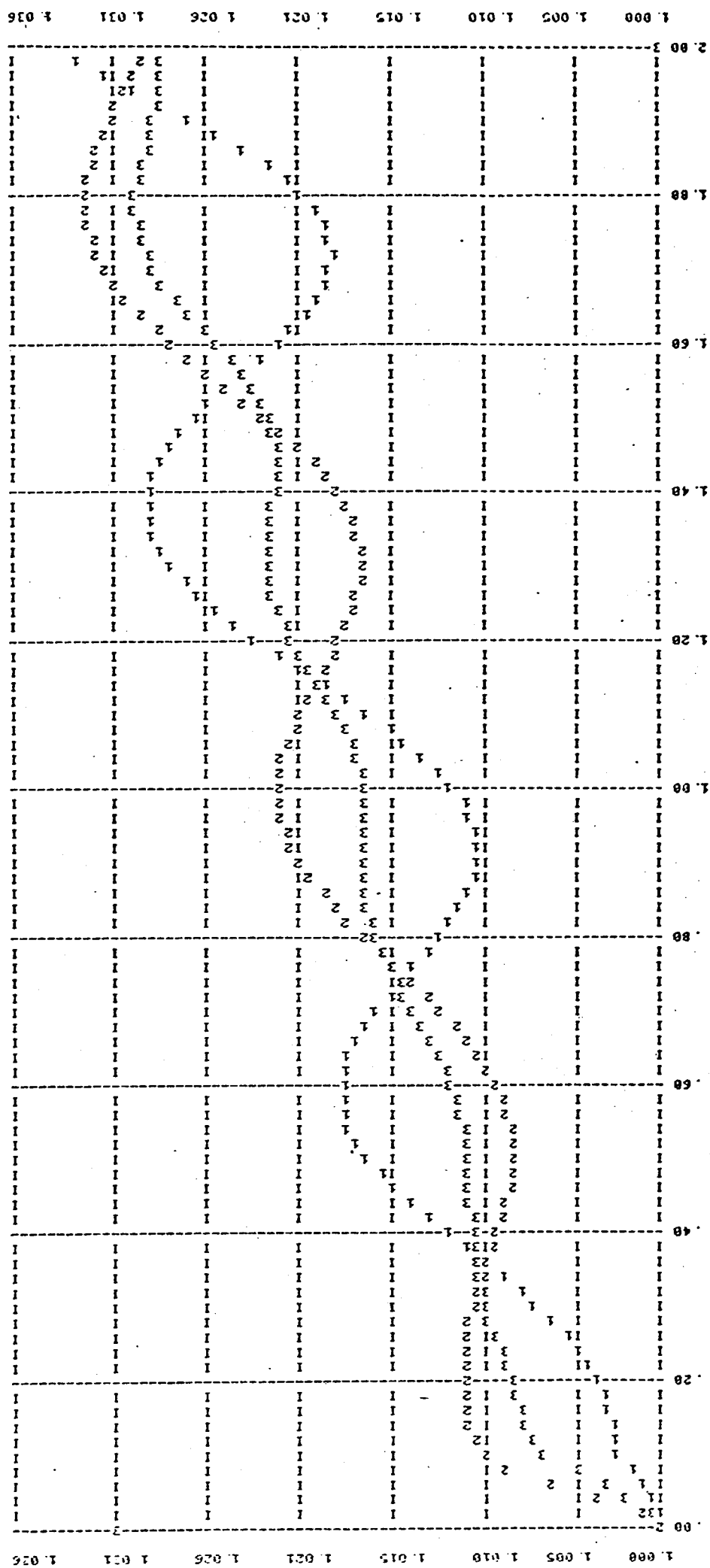
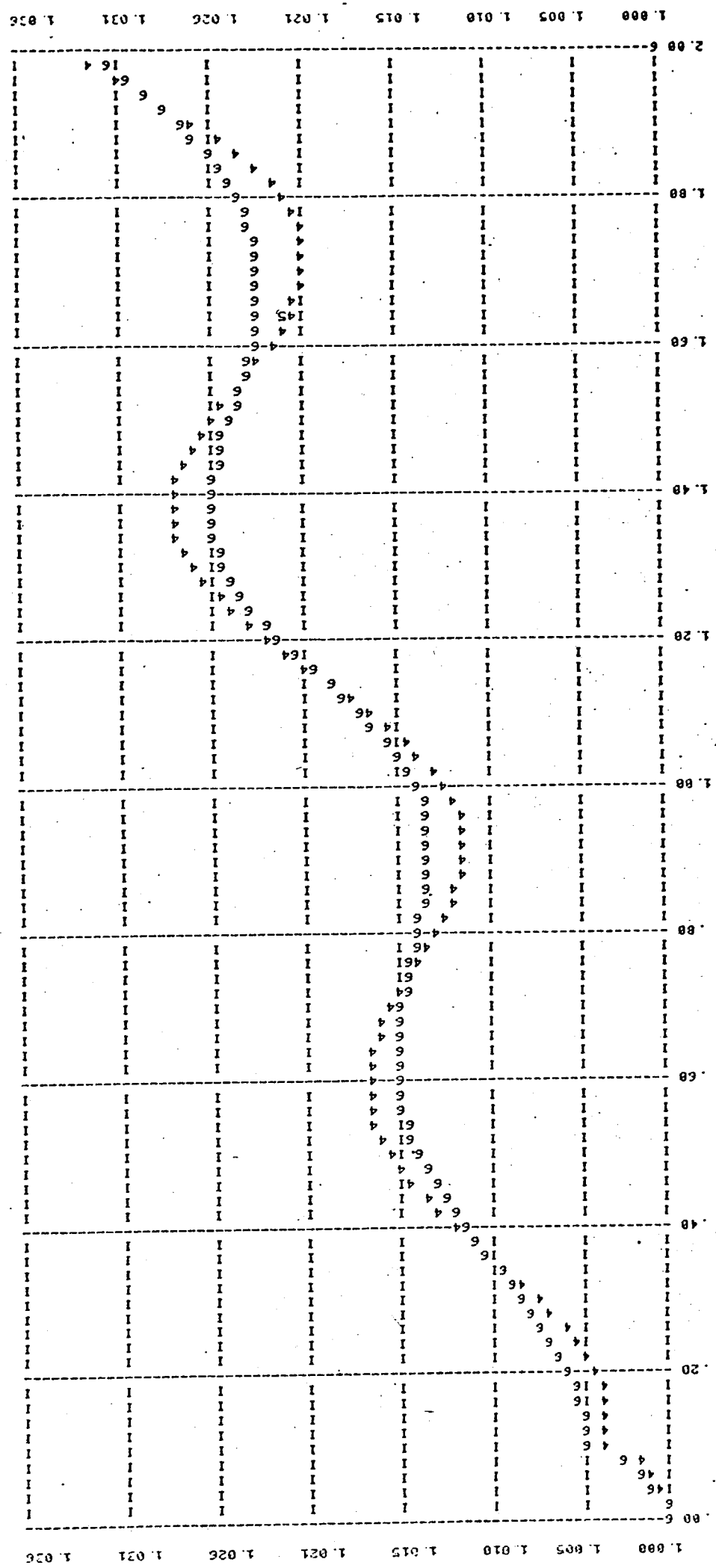


Fig. II.3 - Velocidades angulares ω_1 , ω_2 e ω_3 das barras 1, 2 e 3 do sistema II

Fig. II.4 - Velocidades angulares ω_4 e ω_6 das barras do sistema II



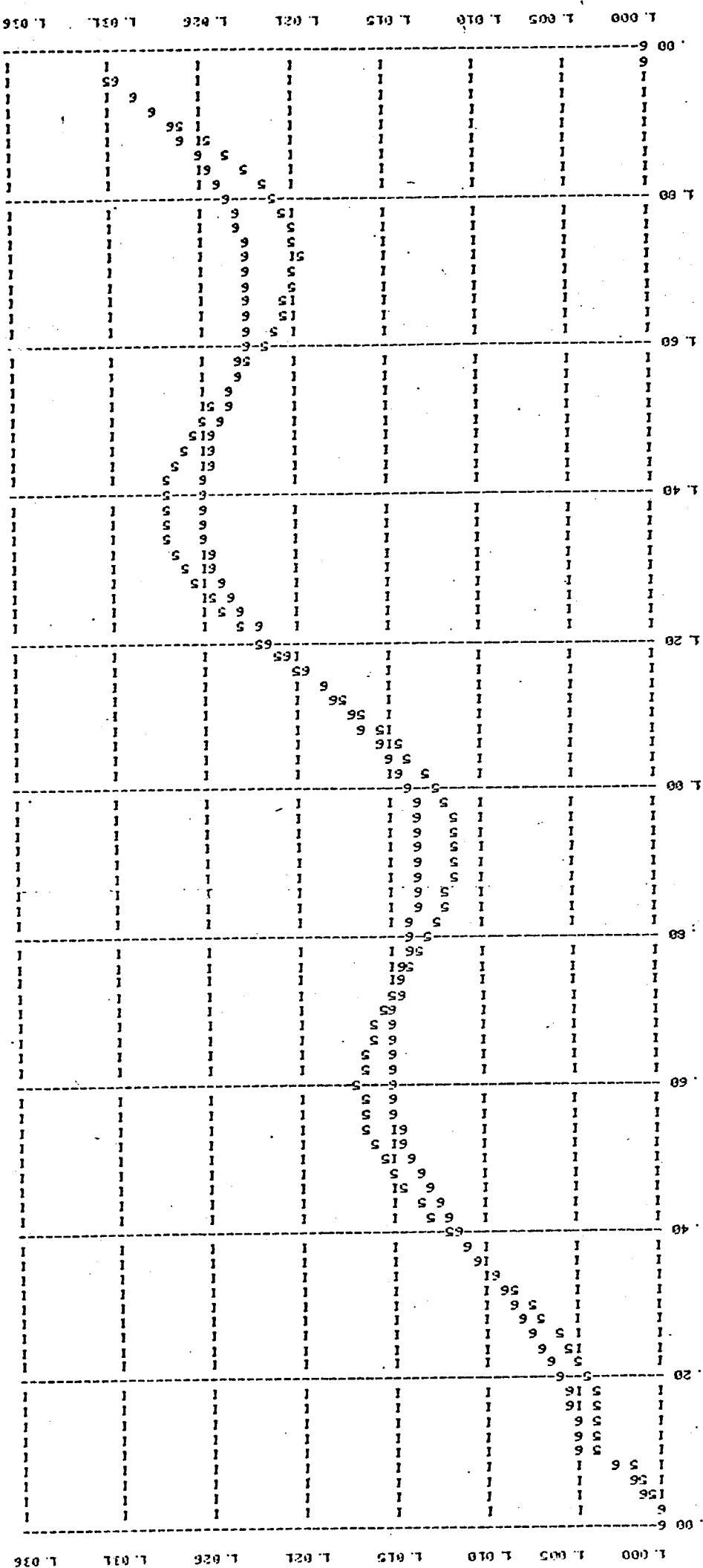
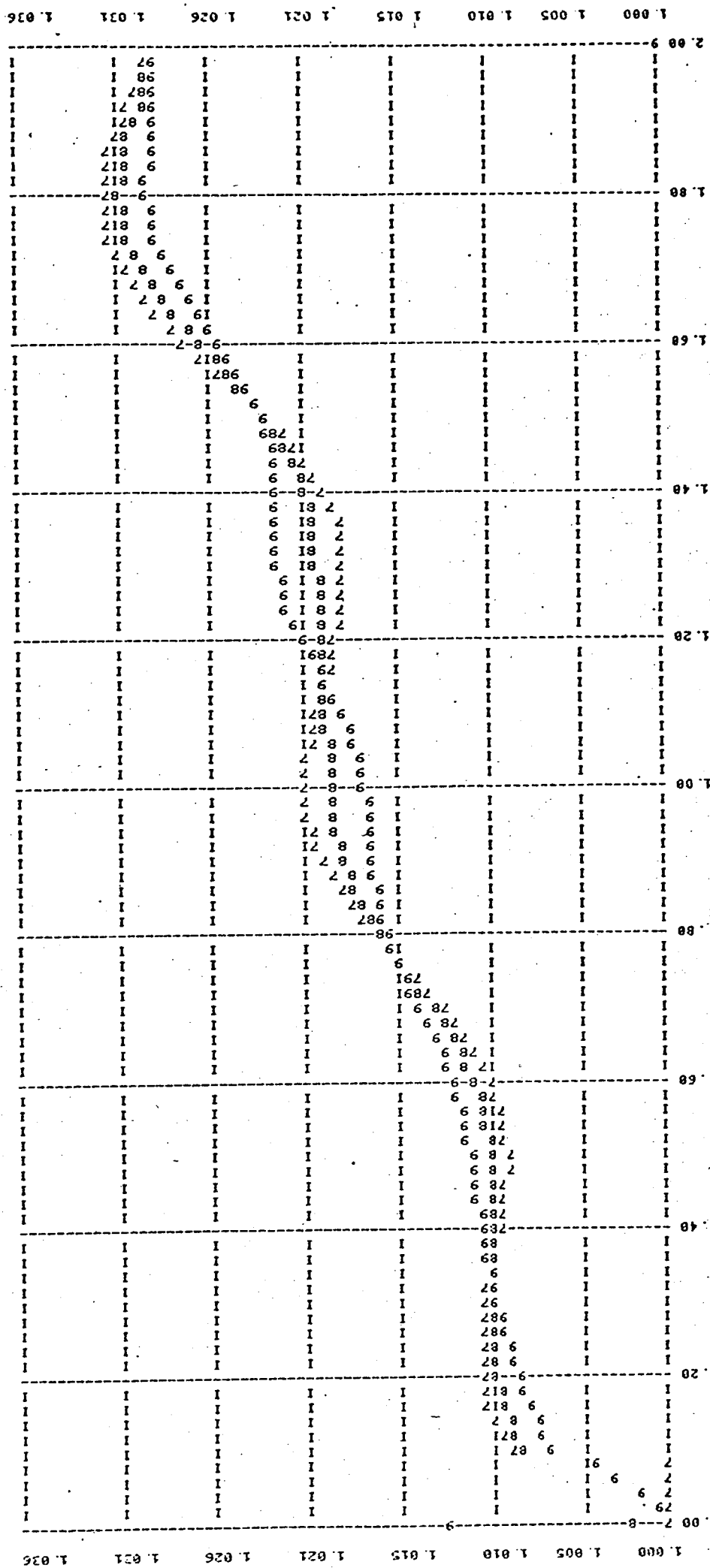


Fig. II.5 - Velocidades angulares ω_5 e ω_6 das barras do sistema II

Fig. II.6 - Velocidades angulares ω_7 , ω_8 e ω_9 das barras do sistema II.



2.6) mostram-se adequadas para o cálculo das velocidades angulares instantâneas das tensões das barras de carga do sistema em questão. Análises semelhantes com outros s.e.p., mostram a mesma coerência e consistência dos resultados aqui apresentados.

II.3. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR INSTANTÂNEA UTILIZADA NO CÁLCULO DAS ADMITÂNCIAS SÉRIE DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A figura II.7 mostra as barras K e j de um sistema elétrico de potência interligadas por uma linha de transmissão representada pelo modelo π .

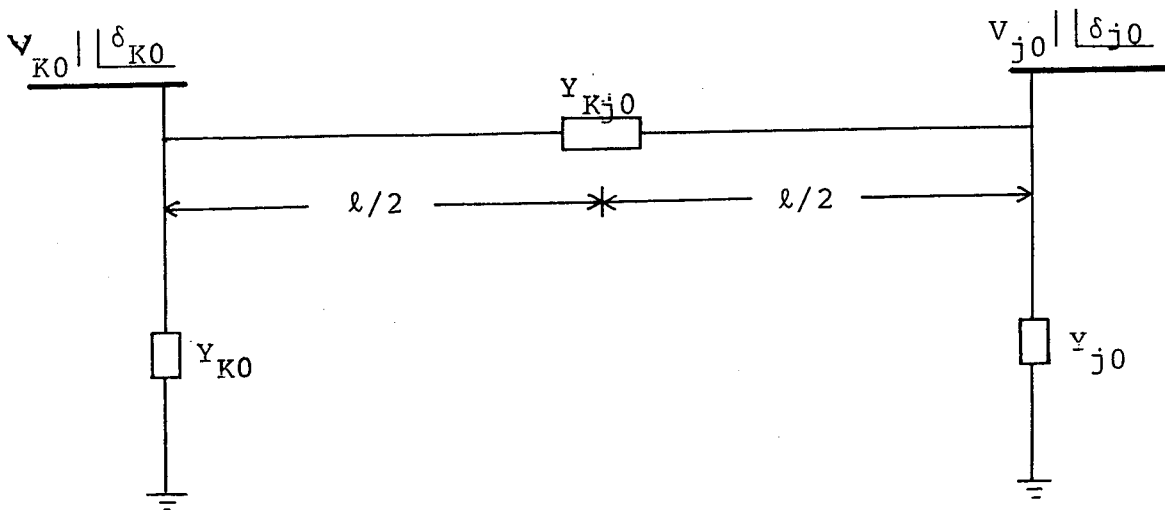


Fig. II.7 - Linha de transmissão representada pelo modelo π

O modelo π de linha de transmissão concentra a admitância série no meio da linha e os elementos shunts nas extremidades [25].

Em regime permanente, as admitâncias shunts são iguais:

$$Y_{K0} = Y_{j0} = \omega_0 C/2 = Y_S/2$$

onde C é a capacitância para a terra da linha.

Em um instante t durante uma perturbação, as velocidades

ω_K e ω_j poderão ser diferentes. Dessa maneira, Y_K será diferente de Y_j e não se sabe com que velocidade angular Y_{Kj} deverá ser calculada.

Com isso, para efeito de cálculo de Y_{Kj} , introduz-se um outro tipo de velocidade angular:

ω_{Kj}^{Δ} = velocidade angular instantânea usada para o cálculo da admitância série Y_{Kj} de uma linha de transmissão ligando duas barras K e j de velocidades angulares ω_K e ω_j , respectivamente.

Para estimar ω_{Kj} , tome-se a linha de transmissão da figura II.7, dividida em duas outras linhas exatamente iguais e ligadas a uma terceira barra m, como mostra a figura II.8.

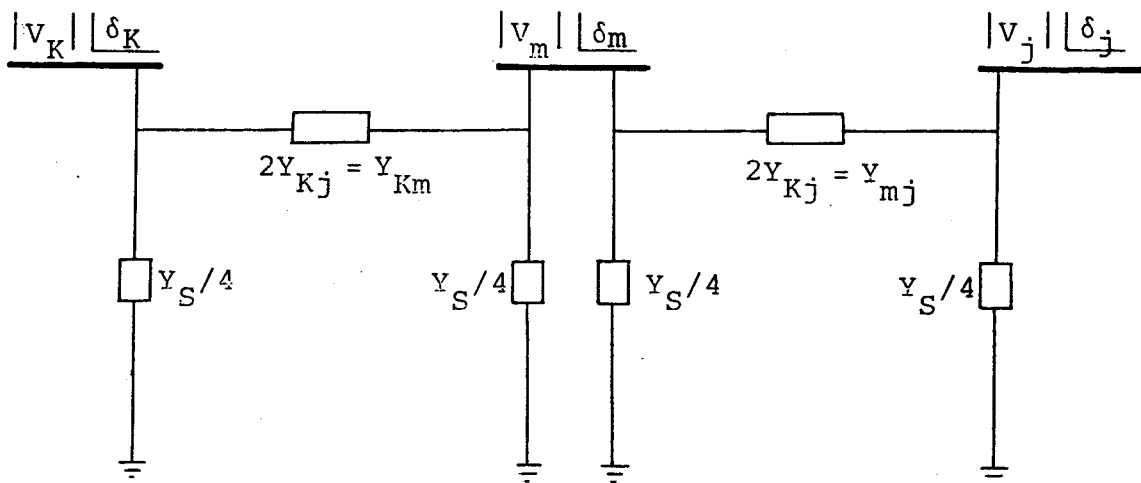


Fig. II.8 - Modelo π de linha de transmissão com inserção da barra artificial m no meio da linha Kj.

A barra m não contém qualquer elemento de geração e/ou carga. É um nó artificial que representa a tensão no meio da linha de transmissão Kj.

Durante uma perturbação, a velocidade angular ω_m é dada por:

$$\omega_m = \frac{d\delta_m}{dt} + \omega_0 \quad (\text{II.3.1})$$

A expressão (II.3.1) simula o valor da velocidade angular instantânea da tensão em uma barra situada à mesma distância elétrica das barras K e j que a admitância Y_{Kj} .

Observou-se nos casos estudados que:

$$\omega_m \cong \frac{\omega_K + \omega_j}{2} \quad (\text{II.3.2})$$

Neste trabalho propõe-se considerar que ω_m seja a velocidade angular instantânea a ser usada no cálculo de Y_{Kj} durante uma perturbação:

$$\omega_{Kj} = \omega_m \quad (\text{II.3.3})$$

Introduzindo-se uma terceira barra entre as barras 4 e 6 do sistema II (Apêndice) e aplicando-se a mesma falha da seção anterior, tem-se as curvas mostradas na Fig. II.9.

Pode-se ver que ω_{46} tem sempre um valor intermediário entre ω_4 e ω_6 (ω_+ = velocidade angular de uma barra intermediária).

Considerando-se que:

1. Em regime permanente

$$\omega_{K0} = \omega_{j0} = \omega_{Kj0} = \omega_0$$

2. As figuras (II.4) e (II.5) mostram que com a perda da linha 3 tem-se:

$$\omega_4 \cong \omega_5$$

3. A figura II.6 mostra um resultado para ω_8 , frente a ω_7 e ω_9 , análogo ao de ω_{46} diante de ω_4 e ω_6 na figura II.9.

afigura-se bastante razoável propor que:

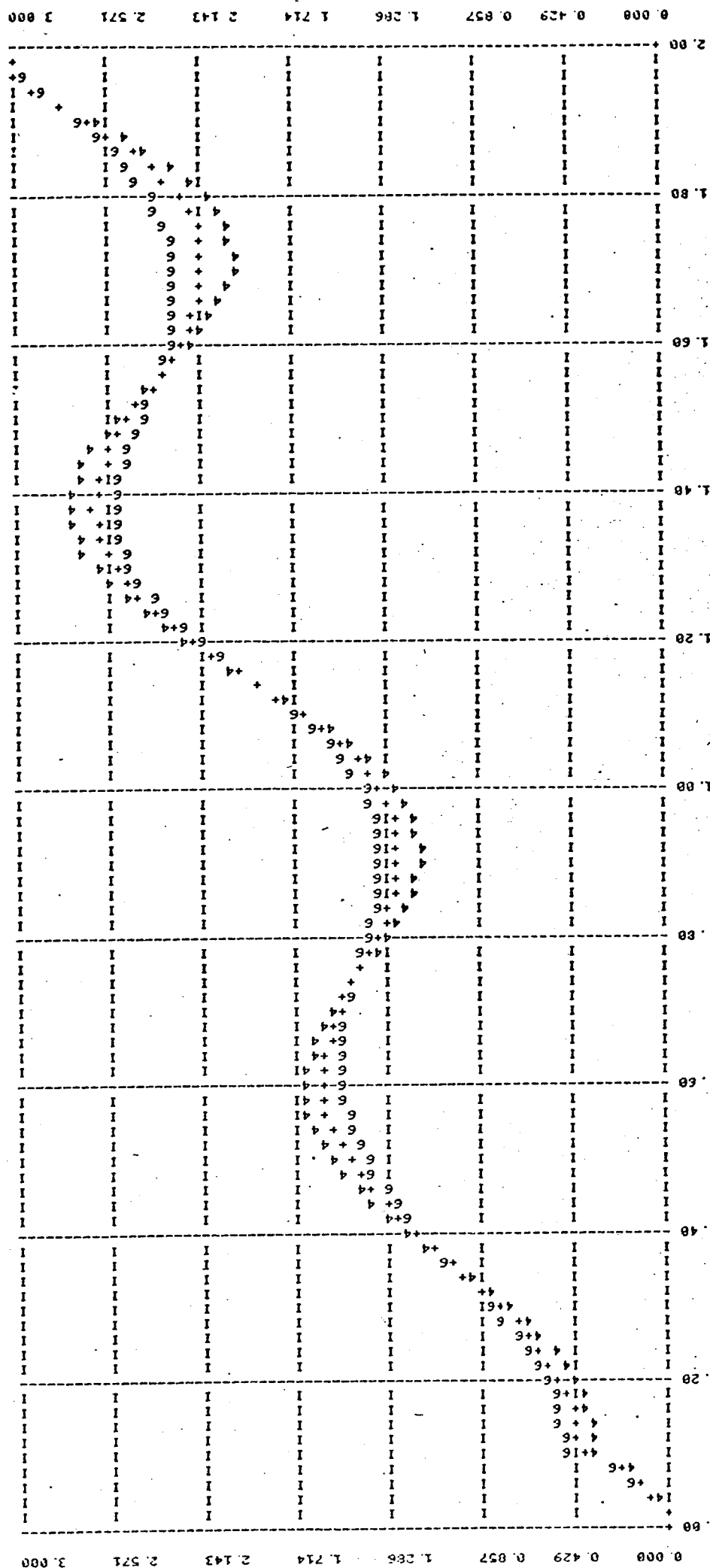


Fig. II.9 - Velocidades angulares ω_4 , ω_6 das barras e ω_+ da barra artificial, sistema II

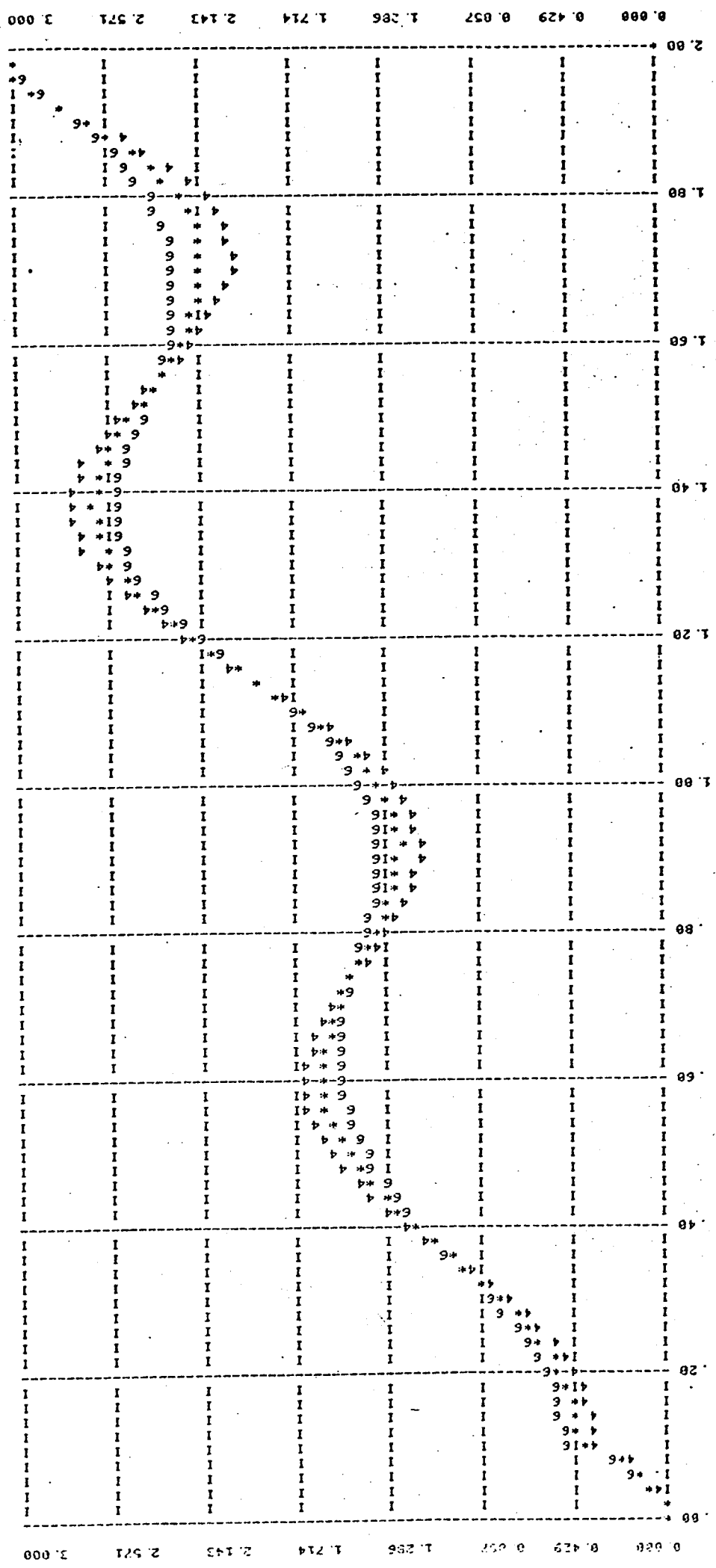


Fig. II.10 - Velocidades angulares ω_4 , ω_6 das barras e $\omega_{46} = \omega_4$ do sistema II

$$\omega_{Kj} = \frac{\omega_K + \omega_j}{2} \quad (\text{II.3.4})$$

Esse resultado atende às considerações levantadas, além de remover a inconveniência da inserção de barras artificiais na análise de estabilidade transitória do sistema.

A figura II.10 mostra $\omega_{46} = \omega_*$ calculada por (II.3.4) e, portanto, sem a introdução de barras fictícias.

As curvas das figuras II.9 e II.10 são iguais.

É necessário deixar claro que tanto a inserção da barra intermediária m , como o uso da média entre as velocidades angulares das barras K e j , são aproximações para o cálculo de Y_{Kj} quando as frequências das barras variam.

Na realidade, admitância é um conceito matemático desenvolvido para análise de circuitos elétricos em regime senoidal permanente, assim como o modelo π de linhas.

Em estudos de estabilidade transitória consagrou-se, entretanto, o uso de modelos matemáticos que usam admitâncias e o modelo π de linhas de transmissão.

Na construção da matriz admitância de barras, as admitâncias shunts Y_S das linhas são adicionadas à diagonal principal, tal como, por exemplo, banco de capacitores ligados diretamente às barras. Considerar Y_{Kj} concentrada no meio, tem o mesmo significado matemático que admitir Y_S nas extremidades das linhas.

CAPÍTULO III

MODELO MATEMÁTICO DE ADMITÂNCIAS
VARIÁVEIS COM A FREQUÊNCIA

III.1. INTRODUÇÃO

No método clássico de estudo de estabilidade, o s.e.p. é considerado em regime permanente durante os intervalos de tempo de integração das equações de balanço dos geradores do sistema.

Baseado nesse fato, os modelos matemáticos de rede de transmissão empregados em estudos de fluxo de carga podem ser utilizados, passo a passo, para refletirem as mudanças, com a frequência, dos parâmetros elétricos do sistema de potência.

O objetivo é o de manter a estrutura de um modelo de matriz admitância de barras para o s.e.p. em regime transitório tal como se apresenta em regime permanente.

Assim, a correção com a frequência, passo a passo, pode ser feita diretamente nas admitâncias da rede elétrica, nas susceptâncias síncronas dos geradores e admitâncias das cargas. Esse procedimento exige que, passo a passo, todas as admitâncias presentes no s.e.p. sejam recalculadas e que a matriz admitância de barras seja refeita.

Para efeito de facilidade computacional e também para efeito de unificação de tratamento matemático, optou-se pela generalização da proposta de modelamento de cargas feito em [13], estendendo-a a todas as outras admitâncias do s.e.p.

Como admitâncias série serão tratados os parâmetros elétricos postos entre barras, de acordo com o modelo de análise transitória adotado [14]:

- admitâncias série das linhas de transmissão.
- susceptâncias síncronas dos geradores.
- admitâncias dos transformadores.

Como admitâncias shunt serão tratados os parâmetros elétricos postos entre as barras e a terra:

- susceptâncias shunt das linhas de transmissão (modelo π)
- susceptâncias dos bancos de capacitores ligados às barras.

- admitâncias das cargas nas barras.

Serão utilizadas as velocidades angulares instantâneas ω_K das tensões das barras de carga, para corrigir as admitâncias shunt, e as velocidades angulares ω_{Kj} , para corrigir as admitâncias série, ambas mostradas no Capítulo II.

III.2. ADMITÂNCIAS VARIÁVEIS COM A FREQUÊNCIA

Considerando-se variações moderadas de frequência, as condutâncias G_K e as susceptâncias B_K shunts serão tratadas de acordo com as expressões (III.2.1) e (III.2.2), respectivamente:

$$G_K = G_{K0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{g_K} \quad (\text{III.2.1})$$

$$B_K = B_{K0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{b_K} \quad (\text{III.2.2})$$

onde G_{K0} e B_{K0} são valores em p.u. de condutâncias e susceptâncias shunts calculadas na frequência síncrona, e g_K e b_K são definidos como *parâmetros característicos da admitância shunt* Y_K .

A velocidade angular ω_K foi discutida no Capítulo II.

Da mesma maneira, as condutâncias G_{Kj} e as susceptâncias B_{Kj} séries serão tratadas de acordo com as expressões (III.2.3) e (III.2.4), respectivamente:

$$G_{Kj} = G_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{g_{Kj}} \quad (\text{III.2.3})$$

$$B_{Kj} = B_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{b_{Kj}} \quad (\text{III.2.4})$$

G_{Kj0} e B_{Kj0} são valores em p.u. de condutâncias e susceptâncias séries calculadas na frequência síncrona, e g_{Kj} e b_{Kj} são definidos como parâmetros característicos da admitância série y_{Kj} .

III.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE ADMITÂNCIAS SHUNT

A figura III.1 mostra uma ligação shunt entre uma barra, com tensão V_K de velocidade angular ω_K , e a terra em um s.e.p.

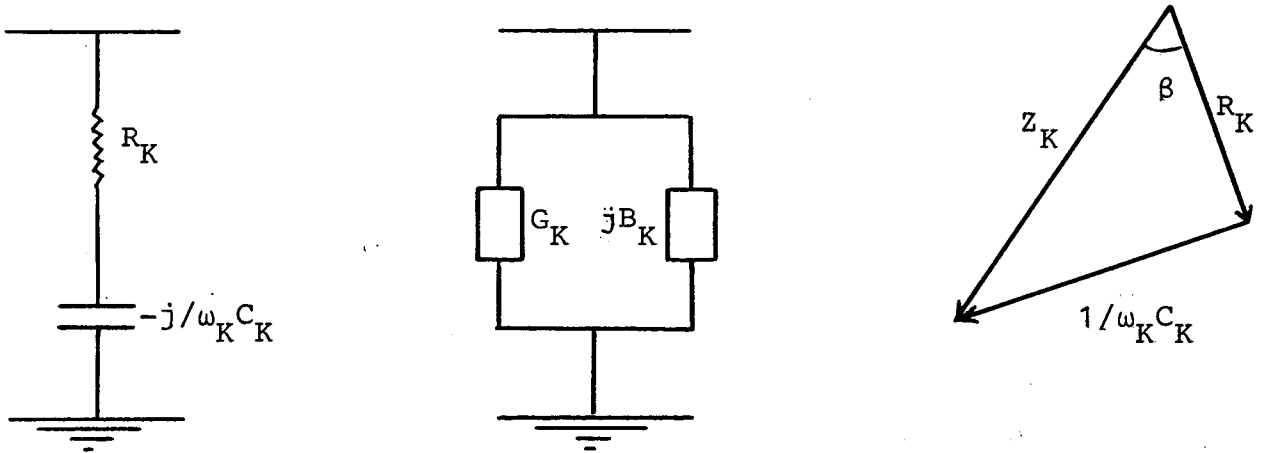


Fig. III.1 -- Ligação shunt barra-terra e diagrama de impedância

Então:

$$|Z_K| = \sqrt{R_K^2 + (1/\omega_K C_K)^2} \quad (\text{III.3.1})$$

$$\text{tg} \beta = -B_K/G_K \quad (\text{III.3.2})$$

A determinação dos parâmetros característicos da admitância shunt pode ser feita da maneira que se segue:

$$Y_K = G_K + jB_K$$

onde

$$G_K = \frac{R_K \omega_K^2 C_K^2}{(R_K \omega_K C_K)^2 + 1} \quad (\text{III.3.3})$$

$$B_K = \frac{\omega_K C_K}{(R_K \omega_K C_K)^2 + 1} \quad (\text{III.3.4})$$

$$G_K = R_K \omega_K C_K B_K \quad (\text{III.3.5})$$

Diferenciando (III.2.1) em relação a ω_K :

$$\frac{dG_K}{d\omega_K} = g_K \frac{G_{K0}}{\omega_K} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{g_K}$$

$$\frac{dG_K}{d\omega_K} = g_K \cdot \frac{G_K}{\omega_K}$$

$$\frac{dG_K}{d\omega_K} \left(\frac{\omega_K}{G_K} \right) = g_K \quad (\text{III.3.6})$$

Da mesma maneira, tem-se:

$$\frac{dB_K}{d\omega_K} \left(\frac{\omega_K}{B_K} \right) = b_K \quad (\text{III.3.7})$$

Diferenciando (III.3.4) em relação a ω_K , vem:

$$\frac{dB_K}{d\omega_K} = \frac{C_K [(R_K \omega_K C_K)^2 + 1] - 2R_K^2 \omega_K^2 C_K^3}{[(R_K \omega_K C_K)^2 + 1]^2}$$

$$\frac{dB_K}{d\omega_K} = \frac{1}{\omega_K} \left(\frac{\omega_K C_K}{(R_K \omega_K C_K)^2 + 1} - \frac{2 \omega_K C_K}{(R_K \omega_K C_K)^2 + 1} \cdot \frac{R_K^2 \omega_K^2 C_K^2}{(R_K \omega_K C_K)^2 + 1} \right)$$

$$\frac{dB_K}{d\omega_K} = \frac{1}{\omega_K} (B_K - 2B_K \cos^2 \beta)$$

$$\cos \beta = \frac{R_K \omega_K C_K}{\sqrt{(R_K \omega_K C_K)^2 + 1}}$$

$$\frac{dB_K}{d\omega_K} \left(\frac{\omega_K}{B_K} \right) = 1 - 2\cos^2 \beta = -\cos 2\beta \quad (\text{III.3.8})$$

Diferenciando (III.3.5) em relação a ω_K :

$$\frac{dG_K}{d\omega_K} = R_K C_K B_K + R_K C_K \omega_K \frac{dB_K}{d\omega_K}$$

$$\frac{dG_K}{d\omega_K} \left(\frac{\omega_K}{G_K} \right) = 1 - \cos 2\beta \quad (\text{III.3.9})$$

Identificando (III.3.6) e (III.3.7) com, respectivamente, (III.3.8) e (III.3.9), tem-se:

$$b_K = -\cos 2\beta \quad (\text{III.3.10})$$

$$g_K = 1 - \cos 2\beta \quad (\text{III.3.11})$$

Substituindo (III.3.10) e (III.3.11) em (III.2.1) e (III.2.2), tem-se:

$$G_K = G_{K0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{1-\cos 2\beta} \quad (\text{III.3.12})$$

$$B_K = B_{K0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{-\cos 2\beta} \quad (\text{III.3.13})$$

As expressões acima serão usadas para o cálculo, passo a passo, das admitâncias shunts do s.e.p. em regime transitório.

III.4. DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES CARACTERÍSTICOS DE ADMITÂNCIAS SÉRIE

A figura III.2 mostra uma ligação série entre duas barras, com tensões V_K e V_j e velocidades angulares ω_K e ω_j , em um s.e.p.

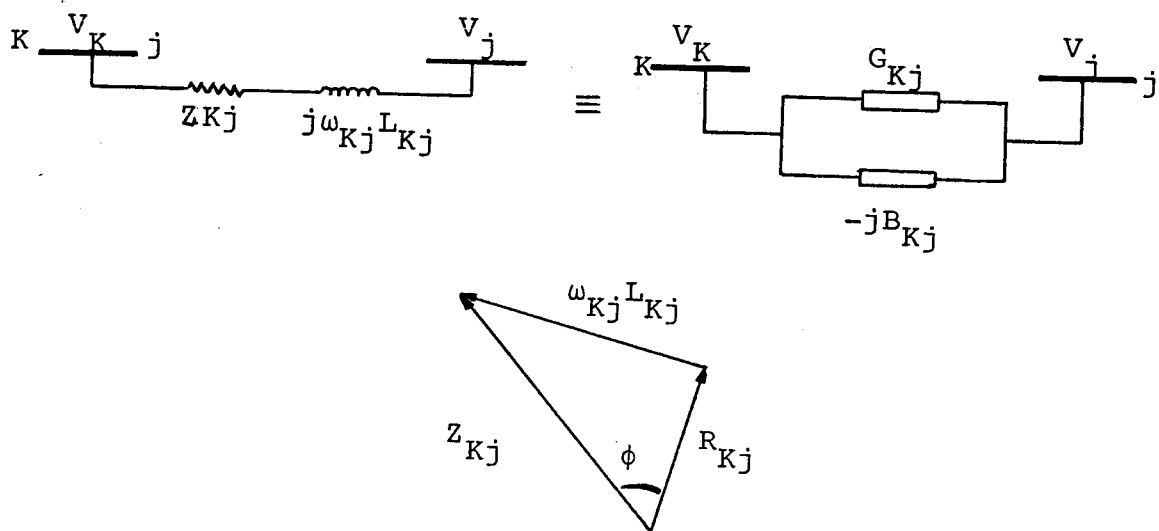


Fig. III.2 - Ligação série entre barras e diagrama de impedância

Então:

$$|Z_{Kj}| = \sqrt{R_{Kj}^2 + (\omega_{Kj} L_{Kj})^2} \quad (\text{III.4.1})$$

$$\text{tg}\phi = B_{Kj}/G_{Kj} \quad (\text{III.4.2})$$

De maneira análoga à anterior, determina-se os parâmetros característicos da admitância série:

$$Y_{Kj} = G_{Kj} - jB_{Kj}$$

onde

$$G_{Kj} = \frac{R_{Kj}}{R_{Kj}^2 + (\omega_{Kj} L_{Kj})^2} \quad (\text{III.4.3})$$

$$B_{Kj} = \frac{\omega_{Kj} L_{Kj}}{R_{Kj}^2 + (\omega_{Kj} L_{Kj})^2} \quad (\text{III.4.4})$$

Em regime permanente, $\omega_{Kj} = \omega_0$.

Diferenciando (III.3.2) e (III.3.4) em relação a ω_{Kj} ,

tem-se:

$$\frac{dG_{Kj}}{d\omega_{Kj}} \left(\frac{\omega_{Kj}}{G_{Kj}} \right) = g_{Kj} \quad (\text{III.4.5})$$

$$\frac{dB_{Kj}}{d\omega_{Kj}} \left(\frac{\omega_{Kj}}{B_{Kj}} \right) = b_{Kj} \quad (\text{III.4.6})$$

Diferenciando (III.4.3) e (III.4.4) em relação a ω_{Kj} ,

tem-se:

$$\frac{dG_{Kj}}{d\omega_{Kj}} \left(\frac{\omega_{Kj}}{G_{Kj}} \right) = \cos 2\phi - 1 \quad (\text{III.4.7})$$

$$\frac{dB_{Kj}}{d\omega_{Kj}} \left(\frac{\omega_{Kj}}{B_{Kj}} \right) = \cos 2\phi \quad (\text{III.4.8})$$

$$\text{sen } \phi = \frac{\omega_{Kj} L_{Kj}}{\sqrt{R_{Kj}^2 + (\omega_{Kj} L_{Kj})^2}}$$

Identificando (III.4.5) e (III.4.6) com, respectivamente, (III.4.7) e (III.4.8):

$$g_{Kj} = \cos 2\phi - 1 \quad (\text{III.4.9})$$

$$b_{Kj} = \cos 2\phi \quad (\text{III.4.10})$$

Substituindo (III.4.9) e (III.4.10) em (III.2.3) e em (III.2.4):

$$G_{Kj} = G_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{\cos 2\phi - 1} \quad (\text{III.4.11})$$

$$B_{Kj} = B_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{\cos 2\phi} \quad (\text{III.4.12})$$

As expressões acima serão usadas para o cálculo, passo a passo, das admitâncias shunt do s.e.p. em regime transitório.

III.5. CARGA REPRESENTADA POR ADMITÂNCIA VARIÁVEL COM A FREQUÊNCIA

A condutância G_{LK0} e susceptância B_{LK0} para a terra que representam a carga, são dadas diretamente pelas potências ativa e reativa concentradas na barra:

$$G_{LK0} = \frac{P_{LK0}}{|V_{K0}|^2} \quad (\text{III.5.1})$$

$$B_{LK0} = \frac{Q_{LK0}}{|V_{K0}|^2} \quad (\text{III.5.2})$$

P_{LK0} e Q_{LK0} são, respectivamente, as potências ativa e reativa da carga no instante da ocorrência de uma perturbação no sistema. V_{K0} é a tensão da barra nesse mesmo instante.

O modelo de admitância que representa a carga e que responde às variações da frequência, é:

$$Y_{LK} = G_{LK0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{g_{LK}} \pm jB_{LK0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{b_{LK}} \quad (\text{III.5.3})$$

Se a carga for considerada indutiva, g_{LK} e b_{LK} são dados por (III.4.9) e (III.4.10), com ϕ_{LK} calculado por (III.4.2), (III.5.1) e (III.5.2).

Se a carga for considerada capacitiva, g_{LK} e b_{LK} são dados por (III.3.10) e (III.3.11), com ϕ_{LK} calculado por (III.3.2), (III.5.1) e (III.5.2).

III.6. MODELO DE MATRIZ ADMITÂNCIA DE BARRAS VARIÁVEL COM A FREQUÊNCIA

A matriz admitância de barras, considerando-se as cargas como impedâncias constantes, em estudos clássicos de estabilidade, tem a seguinte estrutura:

$$Y_{BKj0} = -Y_{Kj0} \quad (\text{III.6.1})$$

$$Y_{BKK0} = \sum_{j \in C_1} Y_{Kj0} + \sum_{m \in C_2} Y_{Km0} + Y_{GK0} + Y_{LK0} \quad (\text{III.6.2})$$

onde

Y_{Kj0} = admitância série entre as barras K e j

Y_{Km0} = admitância shunt m para a terra ligada à barra K

Y_{GK0} = admitância série do gerador ligado à barra K

Y_{LK0} = admitância shunt equivalente à carga concentrada na barra K

C_1 = conjunto das barras ligadas diretamente à barra K

C_2 = conjunto das admitâncias shunts ligadas à barra K

O índice 0 como já se mencionou, representa a admitância na frequência síncrono ω_0 .

Introduzindo-se as variações das admitâncias com a frequência estabelecidas nos itens III.3, III.4 e III.5, pode-se escrever:

$$Y_{BKj} = -G_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{g_{Kj}} + jB_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{b_{Kj}} \quad (\text{III.6.3})$$

$$\begin{aligned} Y_{BKK} = & \sum_{j \in C_1} \left(G_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{g_{Kj}} - jB_{Kj0} \left(\frac{\omega_{Kj}}{\omega_0} \right)^{b_{Kj}} \right) + \\ & + \sum_{m \in C_2} \left(G_{Km0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{g_{Km}} + jB_{Km0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{b_{Km}} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.6.4})$$

onde

Y_{BKj} - inclui todos os parâmetros tratados como admitância série

Y_{BKK} - inclui todos os parâmetros tratados como admitâncias série e shunt, inclusive as cargas.

As expressões (III.6.3) e (III.6.4) são usadas neste trabalho para o cálculo, passo a passo, das admitâncias do s.e.p. e, para simultaneamente refazer a matriz admitância de barras.

III.7: CARGAS COMO IMPEDÂNCIAS

Em alternativa ao modelo das seções anteriores, as cargas podem ser calculadas explicitamente por meio de suas potências ativas e reativas.

O tratamento das cargas como admitâncias shunt feito na seção III.5, conduz a um modelo que responde às variações da frequência:

$$Y_{LK} = G_{LK} + jB_{LK} = G_{LK0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{g_K} + jB_{LK0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{b_K} \quad (\text{III.7.1})$$

onde

$$G_{LK0} = \frac{P_{LK0}}{|V_{K0}|^2} \quad (\text{III.7.2})$$

$$B_{LK0} = \frac{Q_{LK0}}{|V_{K0}|^2} \quad (\text{III.7.3})$$

Em um instante t durante uma perturbação, tem-se:

$$\begin{aligned} P_{LK} &= |V_K|^2 G_{LK} \\ P_{LK} &= |V_K|^2 \left\{ G_{LK0} \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{g_K} \right\} \\ P_{LK} &= P_{LK0} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{g_K} \end{aligned} \quad (\text{III.7.4})$$

Igualmente:

$$Q_{LK} = Q_{LK0} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{b_K} \quad (\text{III.7.5})$$

Se a carga for considerada uma impedância RL, tem-se:

$$P_{LK} = P_{LK0} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{\cos 2\phi_{LK} - 1} \quad (\text{III.7.6})$$

$$Q_{LK} = Q_{LK0} \left(\frac{|V_K|}{|V_{K0}|} \right)^2 \left(\frac{\omega_K}{\omega_0} \right)^{\cos 2\phi_{LK}} \quad (\text{III.7.7})$$

As expressões (III.7.6) e (III.7.7) permitem tratar explicitamente as cargas por meio de suas potências instantâneas. Nesse caso, embora modeladas como impedâncias, as cargas não são adicionadas à diagonal principal da matriz admitância de barras.

III.8. VELOCIDADE ANGULAR INSTANTÂNEA COMO VARIÁVEL DE ESTADO DE BARRA

Nas operações em regime permanente de um s.e.p., a velocidade angular ($\omega_0 = 2\pi f_0$) é considerada constante em todo sistema, e as tensões, de cada barra, são dadas por expressões do tipo:

$$v_K(t) = \sqrt{2} |V_{K0}| \sin(\omega_0 t + \delta_{K0})$$

Os modelos matemáticos utilizados no estudo de fluxo de carga consideram $|V_K|$ e δ_K como variáveis estáticas de estado de barra [3].

Quando o s.e.p. é sujeito a perturbações dinâmicas essas variáveis de estado sofrem mudanças. Nesse caso, $|V_K|$ e δ_K são consideradas variáveis dinâmicas de estado cujos valores, discretizados pelo método numérico de resolução de equações diferenciais em estudos de estabilidade, são revistos a cada resolução das equações algébricas do sistema.

Se o método iterativo de Gauss-Seidel for empregado, as equações algébricas da rede elétrica são escritas como:

$$V_K^{\xi+1} = -\frac{1}{YB_{KK0}} \left(\sum_{j=1}^{K-1} YB_{Kj0} V_j^{\xi+1} + \sum_{j=K+1}^N YB_{Kj0} V_j^{\xi} \right)$$

(III.8.1)

onde YB_{Kj0} e YB_{KK0} são dados por (III.6.1) e (III.6.2), ξ é um contador de iteração e N é o número de barras do s.e.p., inclusive as que representam as tensões internas dos geradores.

Em estudos de estabilidade nos quais são consideradas as velocidades angulares das tensões das barras de carga, as variáveis $|V_K|$ e δ_K não são suficientes para descreverem completamente o estado do s.e.p.:

$$V_K^{\xi+1} = -\frac{1}{YB_{KK}} \left(\sum_{j=1}^{K-1} YB_{Kj} V_j^{\xi+1} + \sum_{j=K+1}^N YB_{Kj} V_j^{\xi} \right)$$

(III.8.2)

onde YB_{Kj} e YB_{KK} são dados por (III.6.3) e (III.6.4), portanto dependentes da frequência.

Uma barra em dois instantes diferentes, t_p e t_q , pode ser caracterizada por idênticos ângulos de fase de tensões

$$\delta_K(t_p) = \delta(t_q)$$

e terem, porém, velocidades angulares diferentes

$$\omega_K(t_p) \neq \omega_K(t_q)$$

como mostra a figura III.3.

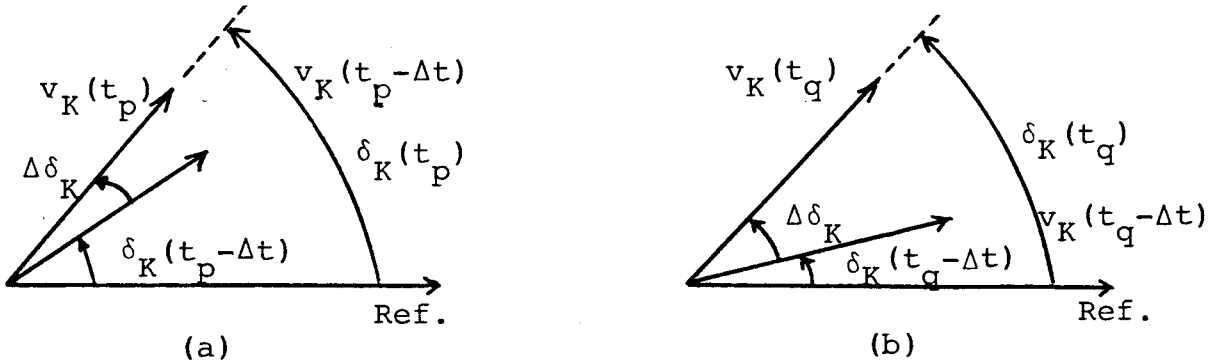


Fig. III.3 - Diagrama fasorial da tensão $v_K(t)$ nos instantes (a) t_p e (b) t_q

A variável ω_K , embora contribua na descrição do estado da rede elétrica, não é calculada explicitamente nas equações algébricas de fluxo de carga do s.e.p. Os valores de $\delta_K(t)$ e $\delta_K(t+\Delta t)$ em (II.2.5) e (II.2.6) são obtidos após dois passos sucessivos de integração das equações diferenciais, com as consequentes resoluções das equações algébricas de fluxo de cargas.

Como pode ser visto no algoritmo apresentado na seção III.9, as admitâncias série e shunt do s.e.p., em um determinado passo, são recalculados após a determinação de $|V_K|$, δ_K e ω_K . Com isso, o modelo matemático adotado introduz desajuste entre o estado e os parâmetros do s.e.p.

Esse inconveniente é contornado calculando-se ω_K por meio de um processo iterativo de ajustes estado-parâmetros do s.e.p. A aplicação de (II.2.6) fornece estimativas de ω_K para as modificações das admitâncias série e shunt, realimentando, dentro de um mesmo passo, resoluções das equações algébricas e diferenciais.

A equação geral do método trapezoidal de integração usado é:

$$\int_t^{t+\Delta t} f(t) dt = \frac{\Delta t}{2} [f(t) + f(t+\Delta t)]$$

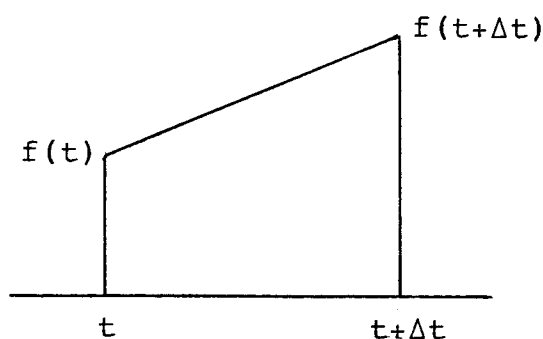


Fig. III.4 - Método trapezoidal de integração

No ajuste estado-parâmetros, até que um estado satisfa

toriamente estático (quando houver convergência em $|v_K|$, δ_K e ω_K) seja obtido, não se conhece o valor definitivo de $f(t+\Delta t)$.

As sucessivas integrações das equações de balanço dos geradores são feitas dentro de um mesmo passo de integração, não implicando em avanço de tempo.

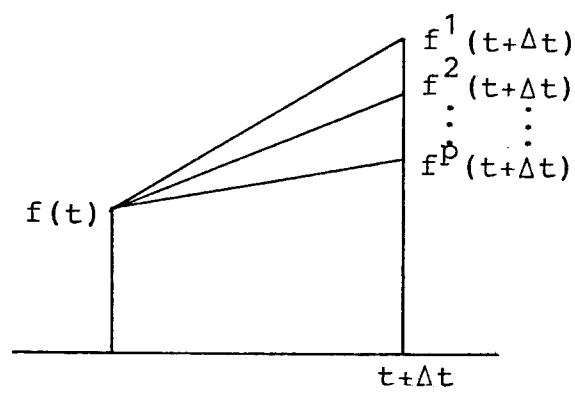


Fig. III.5 - Método trapezoidal de integração e o ajuste estado-parâmetros

O processo de ajuste estado-parâmetros, dentro de um mesmo passo, se encerra quando uma convergência satisfatória em $|v_K|$, δ_K e ω_K é alcançada. Neste ponto pode-se avançar o tempo de integração.

III.9. ALGORÍTMO

O algoritmo implementado neste trabalho, quando se considera os efeitos da frequência no estudo de estabilidade transitória, tem seus passos básicos mostrados a seguir:

1. Cálculo do fluxo de carga pré-falta.
2. Aplicação da falha.
3. Incremento do contador de iterações p do ajuste estado-parâmetros.

4. Resolução das equações algébricas do s.e.p.
5. Integração das equações de balanço dos geradores.
6. Cálculo das velocidades angulares ω_K^p das tensões das barras de carga.
7. Modificação da matriz admitância de barras:
 - 7.1. Zerar a diagonal principal
 - 7.2. Modificação das admitâncias série entre as barras K e j
 - 7.2.1. Cálculo de ω_{Kj}
 - 7.2.2. Cálculo de g_{Kj} e b_{Kj}
 - 7.2.3. Cálculo de Y_{BKj} e Y_{Bjk}
 - 7.2.4. Adição de Y_{BKj} a Y_{BKK} e a Y_{Bjj}
 - 7.3. Modificação das admitâncias shunt na barra K com ω_K :
 - 7.3.1. Cálculo de g_K e b_K
 - 7.3.2. Cálculo de Y_K
 - 7.3.3. Adição de Y_K a Y_{BKK}
8. Repetição dos passos 3, 4, 5 e 6.
9. Teste de convergência de ω_K^{p+1} :
$$|\omega_K^{p+1} - \omega_K^p| \leq \epsilon_\omega$$
 - 9.1. Se não satisfaz, modificar ω_K^{p+1} como se segue:
$$\omega_K^{p+1} = \omega_K^p + (\omega_K^{p+1} - \omega_K^p) \alpha \quad (\alpha \approx 0.35)$$
Voltar ao passo 7.
 - 9.2. Se satisfaz:
 - 9.2.1. Incrementar o tempo de integração
 - 9.2.2. Zerar o contador de ajustes estado-parâmetros p
 - 9.2.3. Voltar ao passo 3 e continuar o processo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E COMENTÁRIOS

IV.1: COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

A figura IV.1 mostra as diferenças angulares entre os geradores do sistema II quando se aplica a mesma falha descrita no Capítulo II e o modelo clássico de cálculo de estabilidade é usado, Vê-se que as diferenças angulares entre os geradores 2 e 3 e o gerador 1, de referência, ampliam-se com o tempo.

A figura IV.2 mostra essas mesmas curvas quando se considera os efeitos da variação da frequência nos cálculos dos parâmetros do s.e.p. Comparando-se as figuras IV.1 e IV.2, constata-se uma diferença considerável entre as curvas de balanço das máquinas.

O modelo proposto neste trabalho mostra o amortecimento introduzido nas curvas de balanço das máquinas devido à variação das cargas com a frequência [31].

Em [31] menciona-se a necessidade de introduzir nas equações diferenciais das máquinas, no modelo clássico, um termo da forma $K(d\delta/dt)$ que se incumbe de amortecer as curvas de balanço dos geradores de modo a torná-las mais próximas da realidade.

A parte mais importante da constante de amortecimento K se relaciona com a parte da carga que o gerador assume quando a frequência varia. O valor de K é determinado com base na experiência [31].

Observa-se que, com o modelo proposto, esta parte do amortecimento aparece espontaneamente sem a colocação do termo $K(d\delta/dt)$ nas equações diferenciais.

A figura IV.3 mostra as velocidades angulares dos geradores do sistema II para o modelo proposto neste trabalho. Em relação à figura II.2 (mesmas curvas anteriores para o modelo clássico) pode-se ver que as velocidades angulares dos geradores no caso clássico oscilam mais.

Nos dois modelos há aumento da velocidade angular durante todo o tempo de simulação. Os comportamentos qualitativos são os mesmos.

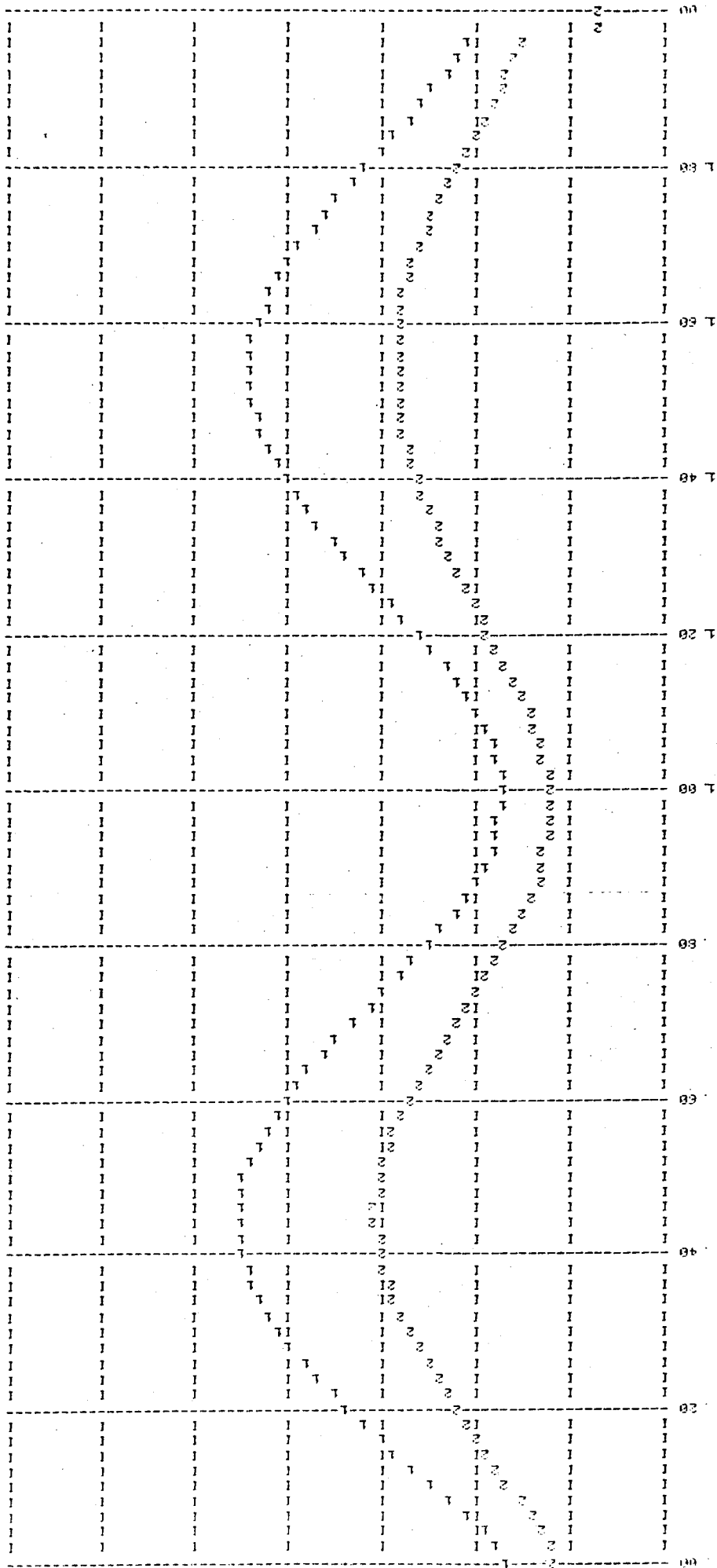


Fig. IV.2 - Modelo Proposto - diferenças angulares $\delta_2 - \delta_1$ (1) e $\delta_3 - \delta_1$ (2) entre os geradores do Sistema II

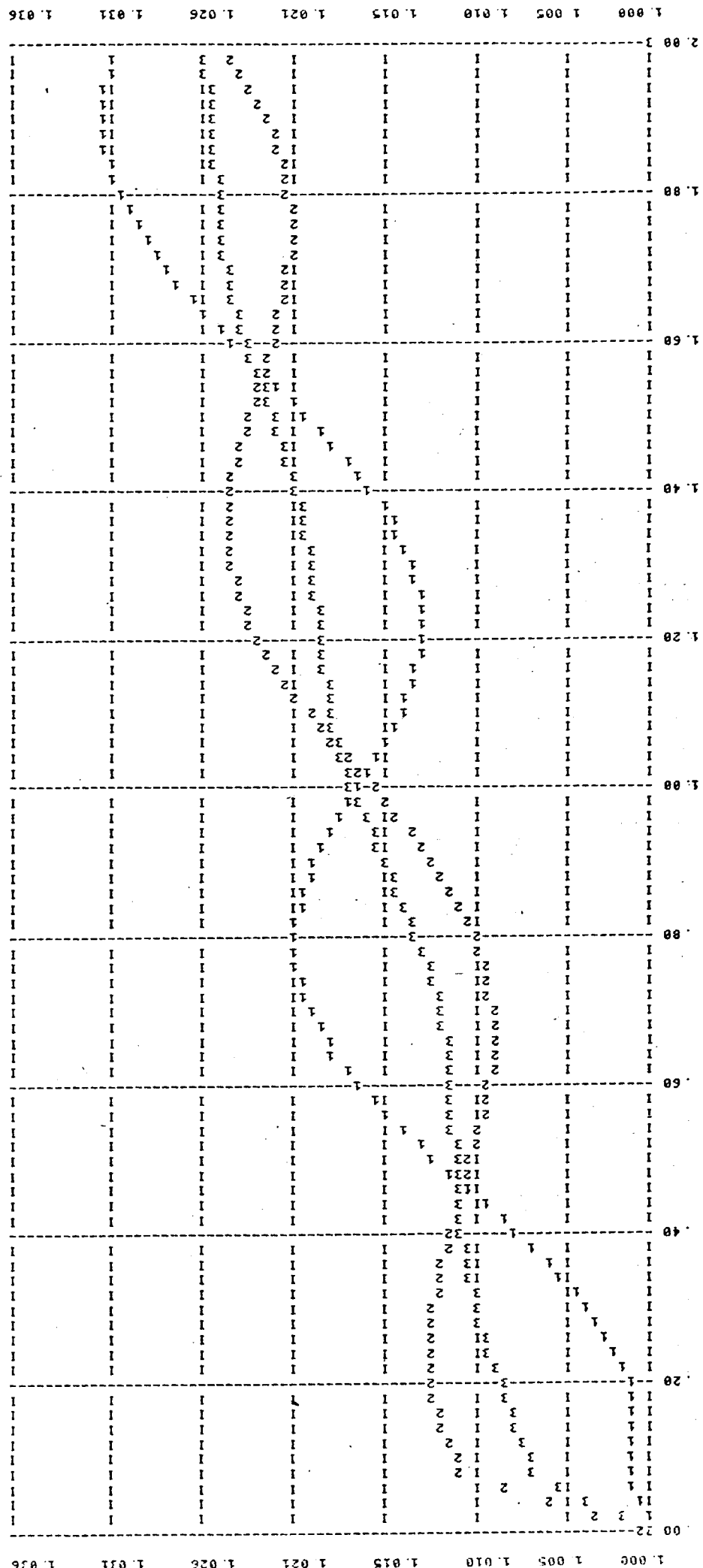


Fig. IV.3 - Modelo Proposto - velocidades angulares dos geradores 1, 2 e 3 do Sistema II

As figuras IV.4 a IV.6 mostram as velocidades angulares das tensões das barras do sistema II para o modelo proposto. São válidas para essas figuras as discussões feitas na seção II.2, para o modelo clássico, em relação ao comportamento relativo das velocidades angulares das tensões nas barras.

Entretanto, para o modelo proposto, as velocidades angulares das tensões das barras ω_k , oscilam menos que no caso clássico. A figura IV.7 mostra a média aritmética e a média ponderada pelas inércias dos geradores do sistema para o estudo clássico de estabilidade.

A equalização das frequências transitórias pelas médias aritmética e ponderada mostra-se uma boa aproximação para as velocidades angulares instantâneas das tensões de barras. Observe-se e compare-se as curvas IV.4 a IV.6 com IV.7.

As figuras IV.8 a IV.16 mostram as curvas obtidas para o sistema I quando ocorre um curto com duração de 0,1s na linha 9, próximo à barra 9. A falha é extinta pela abertura da linha 9.

As conclusões para o sistema II são válidas para as figuras IV.8 e IV.9, sendo mais significativas as diferenças de amplitude das oscilações. É interessante observar nesse caso o amortecimento mais pronunciado apresentado pelas curvas de balanço.

As figuras IV.10 e IV.11 mostram as velocidades angulares dos geradores 4 e 5 do sistema I. No caso clássico, há considerável ampliação da velocidade ω_4 em relação a ω_5 , enquanto no modelo proposto não há, praticamente, ampliação.

As figuras IV.12 a IV.14 mostram as velocidades angulares das barras do sistema I com escala ampliada. Como no sistema anterior, as frequências transitórias das tensões das barras têm valores próximos.

Comparando-se as curvas das figuras IV.15 e IV.16 pode-se ver que, como no sistema anterior, as médias aritméticas e ponderadas pelas inércias, das velocidades dos geradores no modelo clássico, constituem-se em boa aproximação para o valor das fre

[illegible]

Fig. IV.6 - Modelo Proposto - ω_7 , ω_8 e ω_9 das tensões das barras 7, 8 e 9 Sistema II

Fig. IV.7 - Modelo Clássico - média aritmética (A) e média ponderada pelas inércias dos geradores do Sistema II

	1.000	1.005	1.010	1.015	1.021	1.026	1.031	1.036
1.00	I	I	I	I	I	I	I	I
2.00	I	I	I	I	I	I	I	I
3.00	I	I	I	I	I	I	I	I
4.00	I	I	I	I	I	I	I	I
5.00	I	I	I	I	I	I	I	I
6.00	I	I	I	I	I	I	I	I
7.00	I	I	I	I	I	I	I	I
8.00	I	I	I	I	I	I	I	I
9.00	I	I	I	I	I	I	I	I
10.00	I	I	I	I	I	I	I	I
11.00	I	I	I	I	I	I	I	I
12.00	I	I	I	I	I	I	I	I
13.00	I	I	I	I	I	I	I	I
14.00	I	I	I	I	I	I	I	I
15.00	I	I	I	I	I	I	I	I
16.00	I	I	I	I	I	I	I	I
17.00	I	I	I	I	I	I	I	I
18.00	I	I	I	I	I	I	I	I
19.00	I	I	I	I	I	I	I	I
20.00	I	I	I	I	I	I	I	I
21.00	I	I	I	I	I	I	I	I
22.00	I	I	I	I	I	I	I	I
23.00	I	I	I	I	I	I	I	I
24.00	I	I	I	I	I	I	I	I
25.00	I	I	I	I	I	I	I	I
26.00	I	I	I	I	I	I	I	I
27.00	I	I	I	I	I	I	I	I
28.00	I	I	I	I	I	I	I	I
29.00	I	I	I	I	I	I	I	I
30.00	I	I	I	I	I	I	I	I
31.00	I	I	I	I	I	I	I	I
32.00	I	I	I	I	I	I	I	I
33.00	I	I	I	I	I	I	I	I
34.00	I	I	I	I	I	I	I	I
35.00	I	I	I	I	I	I	I	I
36.00	I	I	I	I	I	I	I	I
37.00	I	I	I	I	I	I	I	I
38.00	I	I	I	I	I	I	I	I
39.00	I	I	I	I	I	I	I	I
40.00	I	I	I	I	I	I	I	I
41.00	I	I	I	I	I	I	I	I
42.00	I	I	I	I	I	I	I	I
43.00	I	I	I	I	I	I	I	I
44.00	I	I	I	I	I	I	I	I
45.00	I	I	I	I	I	I	I	I
46.00	I	I	I	I	I	I	I	I
47.00	I	I	I	I	I	I	I	I
48.00	I	I	I	I	I	I	I	I
49.00	I	I	I	I	I	I	I	I
50.00	I	I	I	I	I	I	I	I
51.00	I	I	I	I	I	I	I	I
52.00	I	I	I	I	I	I	I	I
53.00	I	I	I	I	I	I	I	I
54.00	I	I	I	I	I	I	I	I
55.00	I	I	I	I	I	I	I	I
56.00	I	I	I	I	I	I	I	I
57.00	I	I	I	I	I	I	I	I
58.00	I	I	I	I	I	I	I	I
59.00	I	I	I	I	I	I	I	I
60.00	I	I	I	I	I	I	I	I
61.00	I	I	I	I	I	I	I	I
62.00	I	I	I	I	I	I	I	I
63.00	I	I	I	I	I	I	I	I
64.00	I	I	I	I	I	I	I	I
65.00	I	I	I	I	I	I	I	I
66.00	I	I	I	I	I	I	I	I
67.00	I	I	I	I	I	I	I	I
68.00	I	I	I	I	I	I	I	I
69.00	I	I	I	I	I	I	I	I
70.00	I	I	I	I	I	I	I	I
71.00	I	I	I	I	I	I	I	I
72.00	I	I	I	I	I	I	I	I
73.00	I	I	I	I	I	I	I	I
74.00	I	I	I	I	I	I	I	I
75.00	I	I	I	I	I	I	I	I
76.00	I	I	I	I	I	I	I	I
77.00	I	I	I	I	I	I	I	I
78.00	I	I	I	I	I	I	I	I
79.00	I	I	I	I	I	I	I	I
80.00	I	I	I	I	I	I	I	I
81.00	I	I	I	I	I	I	I	I
82.00	I	I	I	I	I	I	I	I
83.00	I	I	I	I	I	I	I	I
84.00	I	I	I	I	I	I	I	I
85.00	I	I	I	I	I	I	I	I
86.00	I	I	I	I	I	I	I	I
87.00	I	I	I	I	I	I	I	I
88.00	I	I	I	I	I	I	I	I
89.00	I	I	I	I	I	I	I	I
90.00	I	I	I	I	I	I	I	I
91.00	I	I	I	I	I	I	I	I
92.00	I	I	I	I	I	I	I	I
93.00	I	I	I	I	I	I	I	I
94.00	I	I	I	I	I	I	I	I
95.00	I	I	I	I	I	I	I	I
96.00	I	I	I	I	I	I	I	I
97.00	I	I	I	I	I	I	I	I
98.00	I	I	I	I	I	I	I	I
99.00	I	I	I	I	I	I	I	I
100.00	I	I	I	I	I	I	I	I

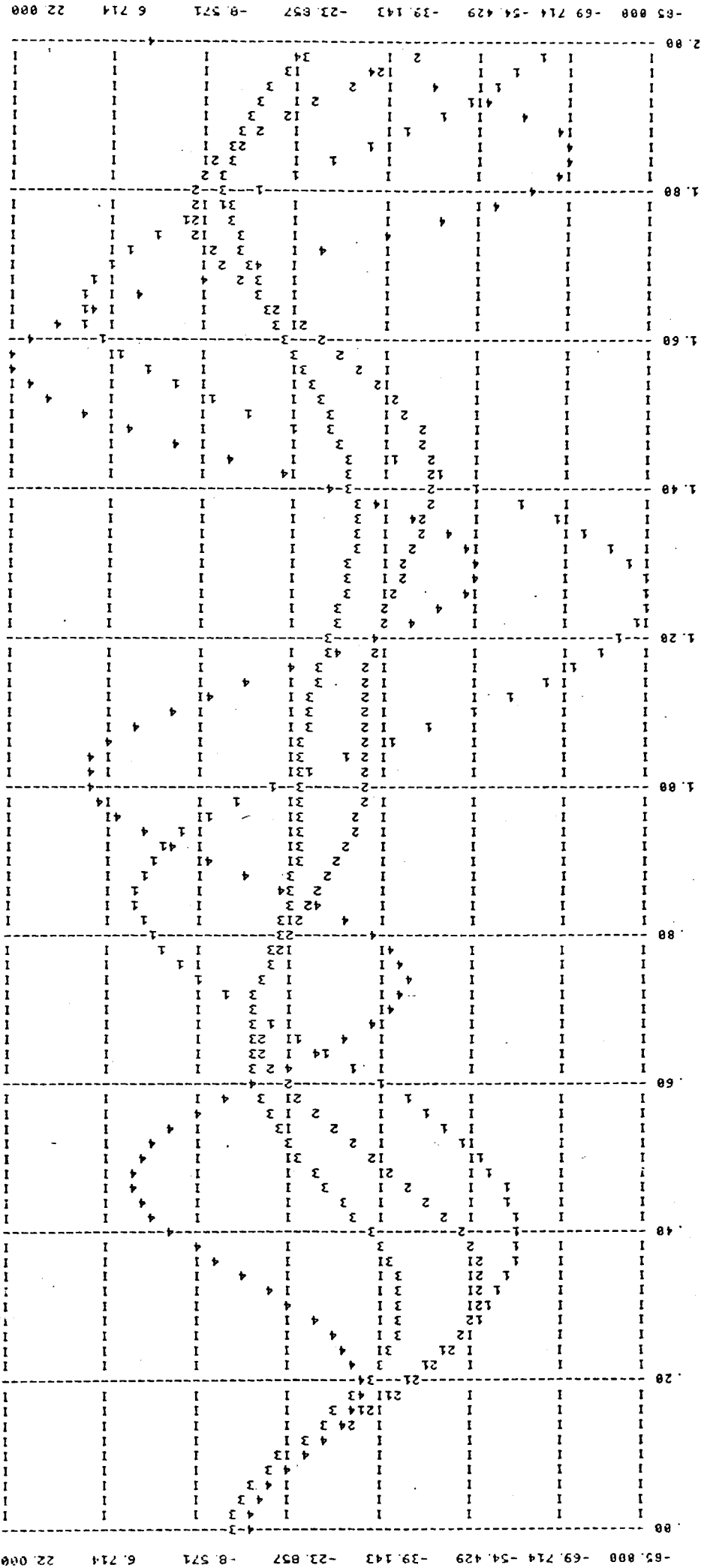


Fig. IV.8 - Modelo Clássico - diferenças angulares

$$\begin{aligned} \delta_1 - \delta_5 &= 1 \\ \delta_2 - \delta_5 &= 2 \\ \delta_3 - \delta_5 &= 3 \\ \delta_4 - \delta_5 &= 4 \end{aligned}$$

entre os geradores do Sistema I

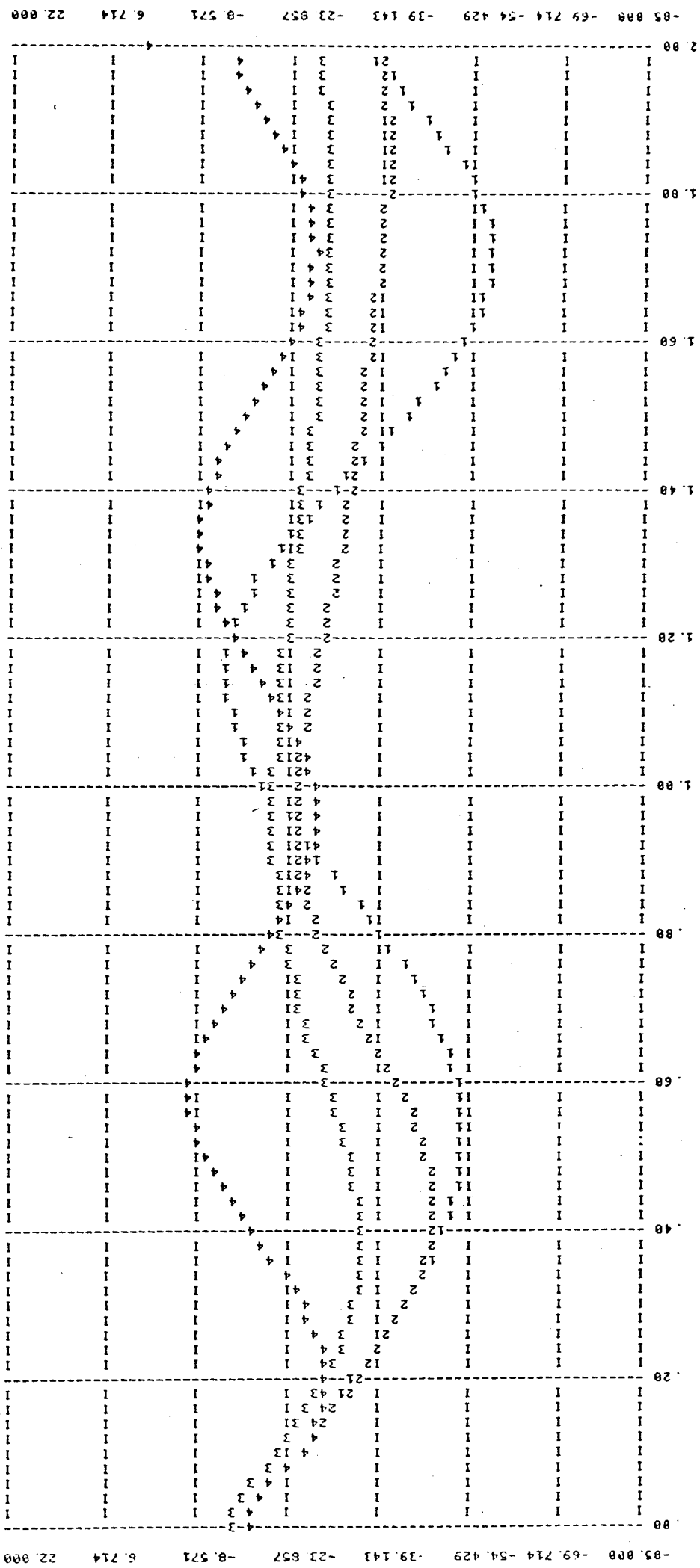


Fig. IV.9 - Modelo Proposto - diferenças angulares

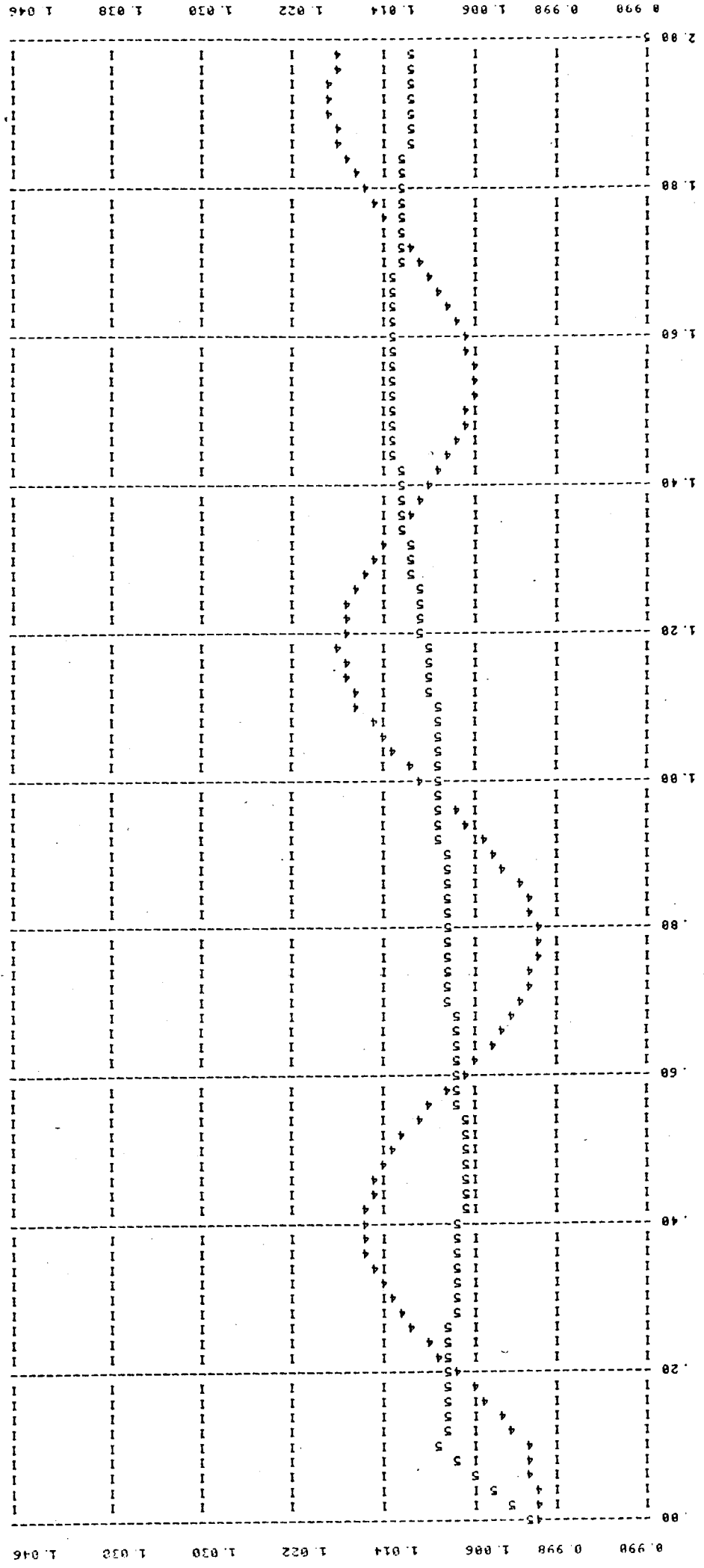
- $\delta_1 - \delta_5 = 1$
- $\delta_2 - \delta_5 = 2$
- $\delta_3 - \delta_5 = 3$
- $\delta_4 - \delta_5 = 4$

entre os geradores do Sistema I



Fig. IV.10 - Modelo Clássico - velocidades angulares ω_4 e ω_5 dos geradores 4 e 5 do Sistema I

Fig. IV.11 - Modelo Proposto - velocidades angulares ω_4 e ω_5 dos geradores 4 e 5 do Sistema I



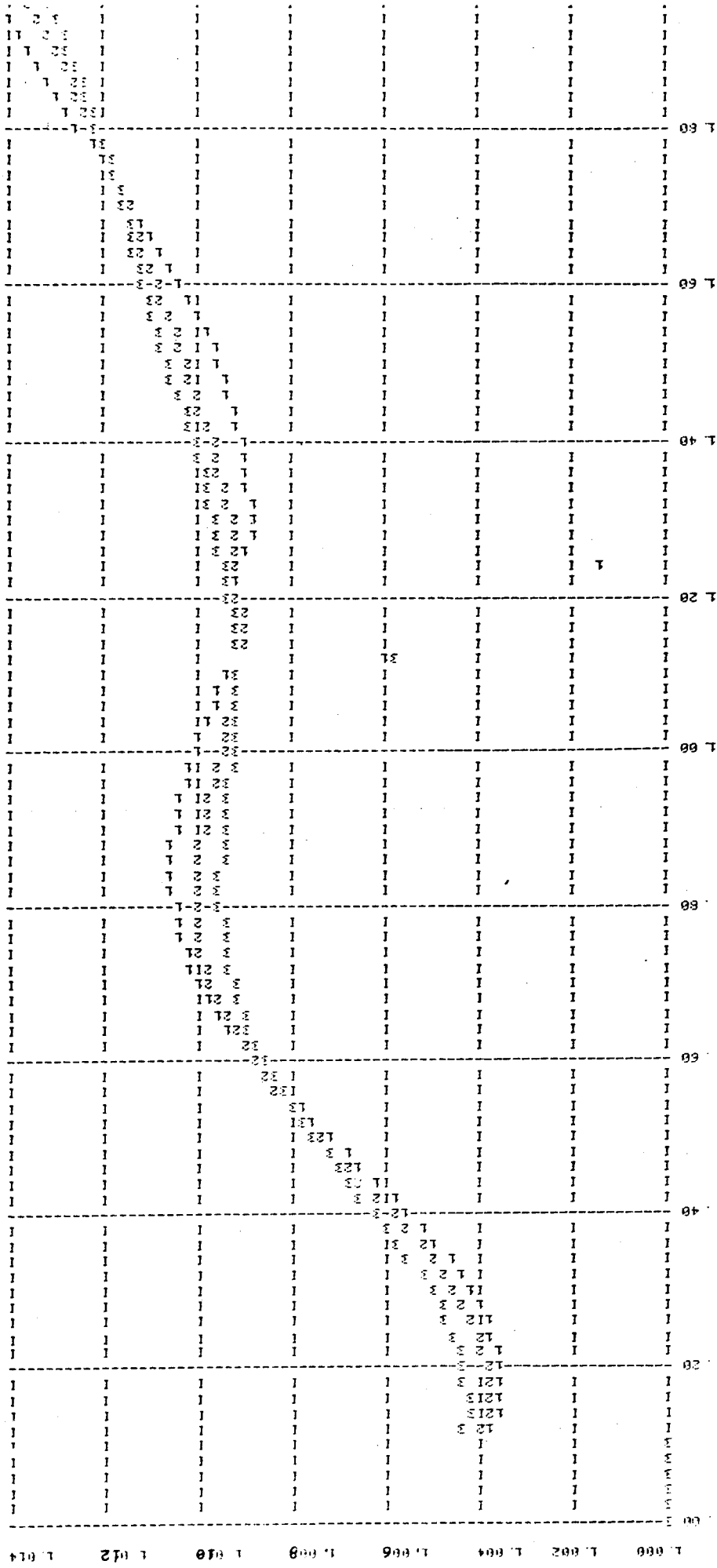


Fig. IV.12 - Velocidades angulares ω_1 , ω_2 e ω_3 das tensões das barras 1, 2 e 3 do sistema I em escala ampliada

quências das tensões de barras no modelo proposto.

IV.2. CONCLUSÕES

Os resultados mostrados na seção anterior permitem concluir que o modelo de análise transitória proposto para se considerar as variações das velocidades angulares no cálculo das admitâncias do s.e.p. é satisfatório.

Deve-se, entretanto, ter em mente que o algoritmo proposto é baseado em aproximações usando a teoria de análise de circuitos elétricos em regime senoidal permanente. O modelo mais geral, para evitar estas aproximações, é o modelo de fluxos magnéticos envolvidos no sistema.

Este modelo porém, exigirá um tempo de computação excessivamente grande para a realização de simulações e, provavelmente, não tornará os resultados muito mais precisos.

Expressões matemáticas mais complexas das equações de balanço dos geradores introduzem amortecimentos devido às cargas do s.e.p. [3,29]. O termo de amortecimento é proporcional à velocidade angular instantânea *equalizada* do sistema [3,19,29].

Ao se considerar as variações das velocidades angulares das tensões das barras no cálculo, passo a passo, das admitâncias que representam as cargas do s.e.p., está-se introduzindo esse efeito de amortecimento no cálculo de estabilidade transitória dos s.e.p.

Quando não se dispõe das velocidades angulares das tensões nas barras sem geração (modelo clássico), as médias aritméticas e ponderadas pelas inércias das velocidades angulares dos geradores podem ser uma boa aproximação para a frequência transitória do s.e.p.

A convergência das velocidades angulares das tensões de barra no processo de ajustes estado-parâmetros aumenta o tempo de

processamento computacional das simulações. Esse tempo depende fortemente dos valores de ε_ω e α do passo 9 do algoritmo da seção III.9 e também do passo Δt de integração.

Para maior precisão do resultado, em virtude do procedimento numérico utilizado, necessitou-se trabalhar com passo de integração pequeno 0,01s. O tempo de computação gasto na simulação usando o método proposto é da ordem de duas vezes o tempo gasto na mesma simulação usando o método clássico.

O método proposto, além de se aplicar a estudos de problemas de estabilidade transitória, se aplica bem também a problemas de controle automático de geração.

Em [19] utilizou-se no modelo linearizado das cargas do sistema a média aritmética das frequências dos geradores como frequência equalizada do sistema. O modelo e método aqui propostos poderiam ser utilizados neste caso com maior precisão, provavelmente, visto tratar-se de um problema de controle.

IV.3. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O algoritmo desenvolvido neste trabalho pode ser implementado em programas de estabilidade mais completos, que considerem os sistemas de excitação, de acionamento, de regulação de velocidade e de tensão e em estudos de controle automático da geração (c.a.g.).

Outros modelos de cargas, que não de impedância, devem ser investigados. Por exemplo, nas expressões (III.7.6) e (III.7.7) distribuições probabilísticas nas demandas P_{LK0} e Q_{LK0} da carga podem ser introduzidas em estudos de estabilidade de média e longa duração.

Métodos numéricos mais eficientes de determinação e convergência de ω devem também ser investigados a fim de diminuir o tempo de computação sem prejudicar a precisão.

BIBLIOGRAFIA

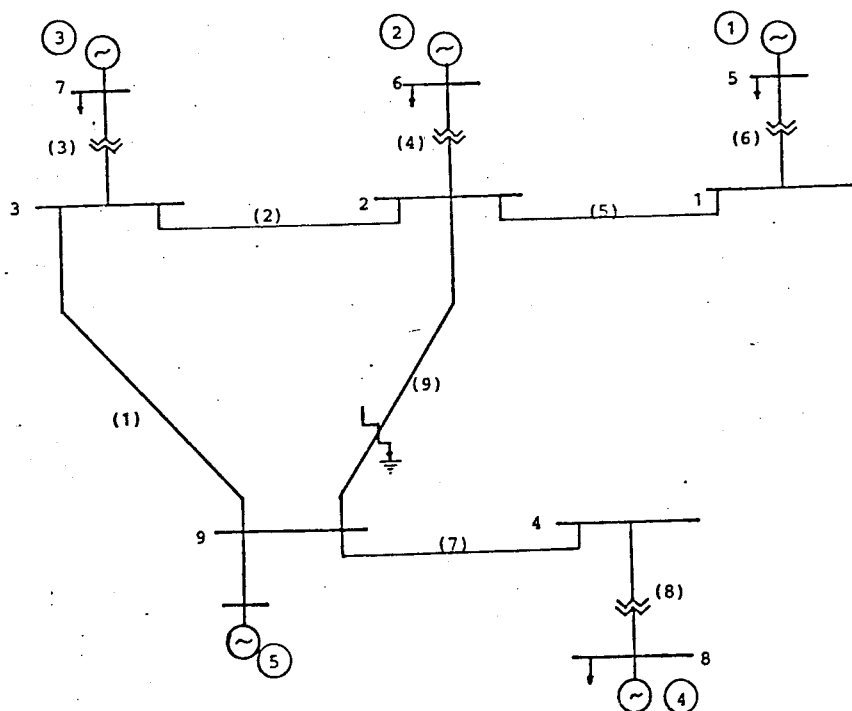
- [1] - MEYER,F.J., "Dinamic State Space Power System Load Model", Tese de Mestrado , Universidade de Houston, Abril de 1981, USA.
- [2] - CONCORDIA,C., "Equipment Modeling Loads", General Electric Utility Engineering Seminar on Power System Stability, 1969, USA.
- [3] - ELGERD,O.I., "Electric Energy Systems Theory: An Introduction", Tata McGraw Hill, 1975, India.
- [4] - VENIKOV,V., "Transient Process in Electrical Power Systems", Mir Publishers, Moscou, 1977.
- [5] - DAHL,O.G.C., "Electric Power Circuits Theory and Applications - Vol. II, Power Systems Stability", McGraw Hill, 1938, USA.
- [6] - NORDANLYCKE,I. e PAULSSON,E., "Solution Methods of Power System Dynamics", Power System Simulation, The Royal Institute of Technology, Estocolmo, 1974.
- [7] - HORE,R.A.; "Advanced Studies in Electrical Power Systems Design", Chapman & Hall, Londres, 1966.
- [8] - CONCORDIA,C. e IHARA,S., "Load Representation in Power System Stability Studies", IEEE Trans. Power App. Syst., PAS 101, pp. 969-977, Abril 1982.
- [9] - ILICETO,F. e outros, "Behaviour of Loads During Voltage Dips Encountered in Stability Studies. Field and Laboratoty Tests", IEEE Trans. Power App. Syst. , PAS 91, pp. 2470-2499, Novembro/Dezembro 1972.
- [10] - SHACKSHAFT,G. e outros, "General Purpose Model of Power-System Loads", Proc. IEE, Vol. 124, pp. 715-723, Agosto 1977, Londres.

- [11] - ANDERSON, P.M. e FOUAD, A.A., "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, 1977, USA.
- [12] - KENT, M.H. e outros, "Dynamic Modeling of Loads in Stability Studies", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-88, pp. 756-763, Maio 1969.
- [13] - BERG, G.J., "Power System Load Representation", IEE Proc., Vol. 120, pp. 344-348, Março 1973, Londres.
- [14] - STAGG, G.W. e EL-ABIAD, A.H., "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw Hill Kogakusha, Tóquio, 1968.
- [15] - FUNK, G., "The Voltage Dependence of Three-Phase Loads", Proc. PSSC, Vol. I, Paper NA7, 1969, Roma.
- [16] - KIMBARK, E.W., Discussão da Ref. [12], pp. 763-764.
- [17] - CAPS Working Group, "System Load Dynamics - Simulation Effects and Determination of Loads Constants", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-92, pp. 600-609, Março/Abril 1973.
- [18] - CHEN, M.S., "Determining Load Characteristics for Transient Performance", EPRI Report EL-849, Project RP849-3, 1979, USA.
- [19] - VINHAS, A.R., "Contribuição ao Estudo do Controle Automático da Geração", Tese de Mestrado, 1983, UNICAMP.
- [20] - CHAN, M.L. e outros, "Dynamic Equivalents for Average System Frequency Behavior Following Major Disturbance", Proc. IEEE Winter Meeting, Janeiro 1972, USA.
- [21] - ASHMOLE, P.H. e outros, "Power-System Model for Large Frequency Disturbances", Proc. IEE, Vol. 121, pp. 601-608, Julho 1974, Londres.

- [22] - GUPTA,P.P. e DAVIES,M.W.H., "Digital Computers in Power System Analysis", Proc. IEE, Vol. 108, pp. 383-404, Janeiro 1961, Londres.
- [23] - STANTON,K.N., "Dinamic Energy Balance Studies for Simulation of Power-Frequency Transients", Proc. PICA Conference, Maio 1971, USA.
- [24] - STOTT,B., "Power System Dinamic Response Calculations", Proc. IEEE, Vol. 67, pp. 212-241, Fevereiro 1979.
- [25] - STEVENSON,W.D., "Elementos de Análise de Sistemas de Potência", McGraw Hill do Brasil,1976.
- [26] - GABRIELLE,G.R., "Power System Loads - Their Effects and Representation During Transient Stability", Tese de Mestrado, Universidade da Pensylvania, Philadelphia, Agosto 1967.
- [27] - BERG,G.J., "System and Load Behaviour Following Loss of Generation", Proc. IEE, Vol. 119, pp. 1483-1486, Outubro 1972, Londres.
- [28] - MCCRAKIN,F.G. e SCHUMUS,W.R., "The Representation of System Loads in Stability Studies", in "Modern Concepts of Power System Dymanic", IEEE Tutorial Course, Text 70M62 PW.R.
- [29] - ARAÚJO,A.R., "Modelos Representativos de Cargas em Estudos de Estabilidade", Tese de Docência Livre, E.F.E.I., Itajubá, 1974.
- [30] - da COSTA,V.F., "Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica", Tese de Mestrado, UNICAMP, 1981.
- [31] - OLIVE,D.W., "Digital Simulation of Synchronous Machine Transient", PICA Conference 1967, in Stability of Large Electric Power Systems by Byerly, R.T. and Kimbark, E.W., IEEE Press, 1974 - USA.

APÊNDICE

SISTEMA I [22]



Dados das linhas

linha	Zser (pu)	Ysh/2 (pu)
1	$0,018 + j0,159$	$j0,478$
2	$0,010 + j0,085$	$j0,256$
3	$0,003 + j0,067$	0
4	$0,004 + j0,084$	0
5	$0,014 + j0,119$	$j0,360$
6	$0,005 + j0,112$	0
7	$0,015 + j0,132$	$j0,592$
8	$0,003 + j0,052$	0
9	$0,022 + j0,198$	$j0,596$

Dados das cargas

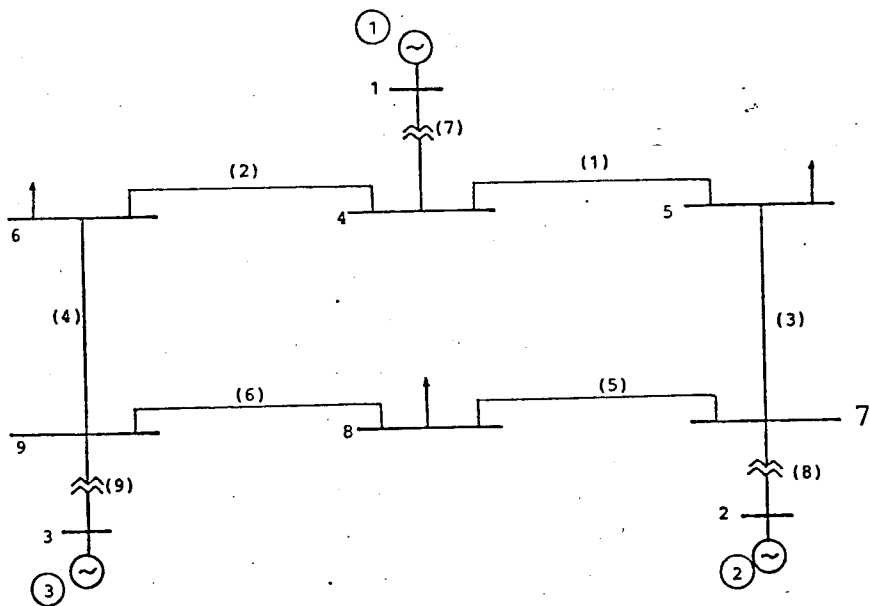
Barra	P (MW)	Q (MVar)
5	222	107
6	231	77
7	285	94
8	359	223

Dados dos geradores

Gerador	X'_d (pu)	H (s)	P (MW)	Q (MVar)
1	0,502	3,90	94	41
2	0,416	3,00	80	35
3	0,400	3,20	94	41
4	0,283	3,10	90	135
5	0,050	22,10	751	263

Base: 200 MVA

SISTEMA II (11)



Dados das linhas

linha	Zser (pu)	Ysh/2 (pu)
1	0,010 + j0,085	j0,088
2	0,017 + j0,092	j0,079
3	0,032 + j0,161	j0,153
4	0,039 + j0,170	j0,179
5	0,085 + j0,072	j0,0745
6	0,0119 + j0,1008	j0,1045
7	j0,0576	
8	j0,0625	
9	j0,0586	

Dados das cargas

Barra	P (MW)	Q (MVAr)
5	125	50
6	90	30
8	100	35

Dados dos geradores

Gerador	X'_d (pu)	H (s)	P	Q
1	0,1198	6,40	71,6	27
2	0,1198	6,40	163,0	6,7
3	0,1813	3,01	85,0	-10,9

Base: 100 MVA