**GAT-022**

**21  a  26  de  Outubro  de  2001**

**Campinas  -  São  Paulo  -  Brasil**

**GRUPO  IV**

**GRUPO  DE  ESTUDO  DE  ANÁLISE  E  TÉCNICAS  DE  SISTEMAS  DE  POTÊNCIA  (GAT)**

**FLUXO  DE  CARGA  EM  SISTEMAS  APRESENTANDO  LINHAS  DE**

**POTÊNCIA  NATURAL  ELEVADA  (LPNE)**

Flávio  Vanderson  Gomes Márcio  de  Pinho  Vinagre\* José  Luiz  Rezende  Pereira

UFJF UFJF UFJF

RESUMO

Este  trabalho  apresenta  um  procedimento  preciso  para

o  cálculo  de  fluxo  de  carga  em  sistemas  elétricos  de

potência  nos  quais  estão  presentes  linhas  de  potência

natural  elevada  (LPNE).  A  metodologia  consiste  no

uso  do  fluxo  de  potência  trifásico  em  coordenadas  de

fase  para  solução  de  um  subsistema  onde  os  efeitos

dos  desequilíbrios  causados  pelas  linhas  LPNEs  são

mais  acentuados.  Para  o  restante  do  sistema  adota-se

o  tradicional  fluxo  de  carga  de  seqüência  positiva.  O

modelo  proposto  foi  validado  em  sistemas  testes.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização  de  linhas  de  transmissão,  LPNE,  Novas

tecnologias,  Parâmetros  de  linhas  de  transmissão,

Fluxo  de  Potência.

1.  0  -  INTRODUÇÃO

A  necessidade  de  transmissão  de  crescentes  blocos

de  energia  a  longas  distâncias  através  de  corredores

cada  vez  mais  restritos,  ditados  ou  por  pressões

ambientais  ou  por  restrições  econômicas,  impõe  o

projeto de linhas de transmissão de grandes

capacidades  [1,  2].

Uma  das  características  das  linhas  tradicionais  é  a

dos  condutores  de  todas  as  fases  ao  longo  de

superfícies  curvilíneas  (fechadas:  coaxial;  ou  abertas:

vertical,  horizontal  ou  parabólico)  de  modo  a  otimizar  a

distribuição  de  campo  elétrico  [6,  7,  8].  Um  exemplo  de

geometria  com  superfície  aberta  é  ilutrado  na  figura  2.

Métodos  tradicionais  para  cálculo  de  parâmetros  da

linha  não  podem  ser  aplicados  às  linhas  destes  tipos,

devido  às  suas  singularidades  de  configuração.  Sendo

assim,  para  o  uso  prático  destas  linhas  é  necessário

recorrer  a  outros  métodos  [8]  para  cálculo  de  seus

parâmetros.

Os  valores  dos  parâmetros  de  seqüência  positiva,

obtidos  a  partir  dos  parâmetros  elétricos  de  seqüência

abc  da  linha  ao  serem  inseridos  no  fluxo  de  potência

não  conduzem  a  valores  de  fluxo  reais  nas  linhas  [9]

sendo,  portanto,  necessário  obter  procedimentos  que

possam  ser  adotados  para  aproximar  os  resultados

calculados  dos  resultados  reais  quando  no  sistema

encontra-se  inserida  um  linha  deste  tipo.

2.  0  –  DESCRIÇÃO  DO  PROBLEMA

Uma  linha  de  transmissão  trifásica  é  um  dispositivo

passivo     tendo     como     parâmetros     matrizes     de

admitância  transversal  Y  e  de  impedância  longitudinal

Z  da  forma  apresentada  em  (1).

padronização  dos  feixes  de  condutores.  Engenheiros

soviéticos  perceberam  que  essa  padronização  era  um

limitante  para  o  projeto  ótimo  de  linhas.  Houve  então  a

edição  de  uma  série  de  trabalhos  [3,  4,  5]  que

apresentavam  novas  concepções  de  projeto,  baseados

na  otimização  dos  feixes.

*zaa*

*Zabc*  =  *zba*

*zca*

*zaa*  ≠*zbb*  ≠

*zab  zac* 

*zbb  zbc* 

*zcb  zcc*  



*zcc          zab*  ≠*zac*  ≠*zbc*

(1)

Foi  criado  um  novo  conceito  de  linha  de  transmissão  o

*zba*  =*zab*

*zca*  =*zac*

*zcb*  =*zbc*

qual emprega arranjos assimétricos para os

subcondutores  das  fases  ao  invés  da  distribuição

simétrica em círculo. Uma das principais

características  destas  linhas  otimizadas  é  o  arranjo

Pela  equação  (2)  é  aparente  que  as  fases  de  um

circuito  trifásico  estão  mutuamente  acopladas  e  que  as

correntes  em  qualquer  condutor  produzirão  quedas  de

\*  Rua  Adelardo  Fortini,  95,  Moradas  do  Serro  -  Juiz  de  Fora,  MG,  Brasil  –  CEP  36018-970

tensão  nos  condutores  adjacentes.  Além  disso,  estas

*z*12 

=   10*z*1

quedas  de  tensão  induzidas  podem  ser  diferentes,

inclusive  para  correntes  balanceadas,  visto  que  as

impedâncias  mútuas  dependem  inteiramente  dos

arranjos  físicos  dos  cabos.

*Z*012

*z*0*z*01*z*02  

*z*

*z*20*z*21*z*2  



(5)

*Va*  *zaa  zab  zac*  *I a* 

*V*    =  *z*

  

 *b*   *ba  zbb  zbc*   *I b* 

*Vc*   *zca  zcb  zcc*   *I c*  

    

*Va*  =*zaa I a*  +*zab I b*  +*zac I c*

(2)

Os  fluxos  de  potência  ativa  e  reativa  nas  linhas  bem

como  as  tensões  nas  barras  terminais  obtidos  pelo

cálculo  do  fluxo  de  potência  de  seqüência  positiva

levando-se  em  conta  os  parâmetros  médios  da  linha

LPNE,  são  diferentes  do  fluxo  e  das  tensões

calculados  considerando-se  os  parâmetros  reais  da

linha     LPNE.     Assim  é  necessário     utilizar     uma

metodologia  diferente  para  a  obtenção  do  fluxo  de

As  impedâncias  mútuas  são  iguais  somente  quando  os

condutores  encontram-se  numa  configuração  de

triângulo  eqüilátero.  Na  prática,  tal  arranjo  de

condutores  é  raramente  utilizado.  Um  meio  de  se

equalizar as indutâncias mútuas é construir

transposições  ou  rotações  dos  cabos  da  linha.  Uma

transposição  é  uma  rotação  física  dos  condutores  feita

de  forma  que  cada  condutor  é  movido  para  ocupar  a

próxima  posição  física  de  uma  seqüência  regular,

como  abc,  bca,  cab,  etc.  As  impedâncias  próprias

dependem  do  raio  médio  geométrico,  ou  seja,  da

geometria  do  feixe.

Para as linhas de transmissão tradicionais

completamente transpostas ou para efeito de

simplificação, assume-se que sua matriz de

impedância  longitudinal  tem  aspecto  igual  ao  que  é

mostrado  em  (3).

potência  nas  linhas  de  um  sistema,  quando  este

apresentar  linhas  de  potência  natural  elevada.

3.0  -  SOLUÇÕES  PARA  O  PROBLEMA

**3.1  A  solução  ideal**

Como  foi  visto  no  item  2,  os  programas  de  fluxo  de

carga  devem  permitir  representar  os  parâmetros

mútuos  de  impedância  longitudinal  e  admitância

transversal     das     LPNEs,     os     quais,     se     forem

desconsiderados,       podem       causar       divergências

significativas  entre  os  estudos  e  operação  em  tempo

real.  Desta  forma,  a  solução  ideal  para  cálculo  de  fluxo

de  carga  em  sistemas  onde  encontram-se  inseridas

linhas  de  potência  natural  elevada  é  utilizar  como

ferramenta  o  fluxo  de  potência  trifásico  [10]  o  qual  leva

em  conta  tais  parâmetros  mútuos  entre  fases.

*zs  zm  zm* 

*Zabc*  =  *zm  zs  zm* 

*zm  zm  zs* 



*z* +*zbb*  +*zcc*

*zs*  = *aa*

3

*zm*  =

*zab*  +*zac*  +*zbc*

3

(3)

Esta  solução  não  é  muito  aconselhável  para  grandes

sistemas  de  potência,  pois  o  tempo  computacional

gasto  para  o  cálculo  do  fluxo  de  carga  trifásico  torna-

se  significativo  com  o  aumento  do  número  de  barras.

Além  disso,  a  magnitude  dos  efeitos  dos  desequilíbrios

causados  pelas  LPNEs  são  mais  acentuados  nas

barras  próximas  a  estas  linhas.

Fazendo-se  a  transformação  de  (3)  para  componentes

simétricos,  a  matriz  transformada  (4)  será  diagonal.

Assim,  o  sistema,  mesmo  que  as  grandezas  V  e  I

sejam  desequilibradas,  pode  ser  calculado  como  a

superposição  de  sistemas  equilibrados  desacoplados

entre  si.

**3.2.  A  solução  proposta**

A  solução  mais  eficiente  para  se  obter  o  fluxo  de  carga

quando  existem  LPNEs  em  um  sistema  de  potência,  é

utilizar  o  fluxo  trifásico  somente  para  uma  subrede,

constituída  pelas  barras  nas  quais  os  efeitos  de

desequilíbrio  da  linha  são  mais  acentuados,  e  utilizar  o

*Z*012

=  

*z*0





*z*1







*z*2 



(4)

fluxo  de  potência  de  seqüência  positiva  para  o  resto  do

sistema.  Esta  solução  permite  aliar  a  precisão  do  fluxo

trifásico  à  rapidez  do  fluxo  de  potência  de  seqüência

positiva.

Analogamente,  pode-se  obter  a  matriz  de  admitância

transversal  em  componentes  simétricas.

Para  as  linhas  de  transmissão  de  potência  natural

elevada  (LPNE),  as  matrizes  dos  parâmetros  elétricos

calculados  apresentam  ambos  os  parâmetros  próprios

e  mútuos  distintos  entre  si,  e  assim,  a  transformação

por  componentes  simétricas  não  desacopla  o  sistema,

originando  (5).

Os  resultados  obtidos  ainda  são  aproximações  dos

valores  reais  obtidos  quando  se  calcula  o  fluxo  trifásico

para  todo  o  sistema,  porém,  são  bem  melhores  do  que

aqueles  fornecidos  apenas  pelo  fluxo  de  seqüência

positiva.

4.0  -  DESCRIÇÃO  DO  MÉTODO  PROPOSTO

...

...

...

...

...

**4.1  Metodologia**

*Passo  1*:  Deve-se  inicialmente  calcular  o  fluxo  de

carga  de  seqüência  positiva  (fluxo  monofásico)  para

todas  as  barras  do  sistema.

*Passo  2*:  Divide-se  o  sistema  em  duas  regiões,  uma

que  contém  as  LPNEs  e  as  suas  barras  vizinhas

(região  A),  e  outra  que  não  contém  as  LPNEs,  (região

B).  Existe  também  um  conjunto  de  barras  que

compõem a fronteira entre as duas regiões.

Inicialmente  define-se  a  região  A  como  o  conjunto

constituído  pelas  barras  terminais  das  linhas  de

potência  natural  elevada  e  pelas  barras  de  até  terceira

vizinhança destas linhas. Testes realizados

*Passo  7*:  Os  valores  dos  fluxos  e  tensões  no  sistema

são  estes  obtidos  pelo  fluxo  trifásico  para  as  barras  e

linhas  da  região  A,  e  aqueles  obtidos  pelo  fluxo  de

seqüência  positiva  para  as  barras  e  linhas  da  região  B.

*Passo  8:*  Expandir  a  região  A  (conforme  descrito  na

seção  4.3)  englobando-se  a  próxima  vizinhança  da(s)

barra(s)  que  não  atendeu  (eram)  a  tolerância  em

questão.  Volta-se  ao  passo  3  e  o  processo  iterativo

prossegue  até  que  a  tolerância  seja  atendida.

**4.2  Diferenças  de  potência  nas  barras  de  fronteira**

**entre  os  fluxos  calculados**

demonstraram  que,  na  maioria  dos  casos,  as  barras

além  da  terceira  vizinhança  constituem  a  região  onde

os  desequilíbrios  são  bem  menos  acentuados.

*Passo  3*:  Utiliza-se  (6)  para  a  obtenção  dos  parâmetros

das  linhas  do  subsistema  definido  anteriormente,  em

seqüência  abc,  a  partir  dos  parâmetros  de  seqüência

R egião  A

**Barra de**

**fronteira**

*Pka*,*Qka*

a

C onjunto  Ω*i*

**Barras**

**externas ligadas a**

**barra k**

positiva  e  zero.  Na  ausência  dos  valores  reais  de*z*0  e

*y*0

podem   ser   adotadas   as   aproximações:

*Pki* ,*Qki*

 *m*  1

*z*0  =  3.*z*1*e  y*0  =

− 1 *z*1  

*zs*  

1

*z*    =  

2   *z*0 

− 1  *y*1  

*ys*  

1

*y*    =  

2    *y*0 

 *m*  1

1

3

−1

−1

*y*1

     

     

(6)

*P*\**Q*\*

*k* *k*

*Pk  Qk*

k

*Pkn*,*Qkn*

i

*Passo  4*:  As  barras  de  fronteira  da  região  A  são

transformadas  em  barras  de  referência,  fixando  os

valores  de  tensão  e  ângulo  naqueles  convergidos  para

estas  barras  pelo  fluxo  de  seqüência  positiva  no  passo

1. As demais barras permanecem conforme

especificadas  no  sistema  original.

*Passo  5*:  Calcular  o  fluxo  de  carga  trifásico  para  a

região  A,  considerando-se  os  parâmetros  de  suas

linhas  em  seqüência  abc  (passo  3)  e  as  barras  de

fronteira  transformadas  em  barras  de  referência  (passo

4).

*Passo  6*:  Após  a  convergência  do  fluxo  de  potência

trifásico  local,  para  todas  as  barras  de  fronteira

verificar  se  a  diferença  máxima  entre  as  potências

calculadas  pelo  fluxo  de  carga  local  trifásico  e  pelo

fluxo  de  seqüência  positiva  (passo  1)  está  dentro  de

uma  tolerância  especificada  conforme  descrito  na

seção  4.2.

• Se  esta  diferença  estiver  dentro  de  uma

tolerância pré-estabelecida, deve-se

prosseguir  para  o  passo  7.

• Se  alguma  barra  não  atender  à  tolerância

anteriormente  citada,  deve-se  prosseguir  para

o  passo  8

n

FIGURA  1  –  Fluxos  através  da  barra  de  fronteira

Sejam:

k  uma  barra  de  fronteira  da  região  A  obtida  conforme

4.1.  passo  2;

Ω*i*  o  conjunto  de  barras  externas  a  região  A  ligadas  a

barra  k;

*Pk* ,*Qk* ,  as  potências  ativa  e  reativa  injetadas  na  barra

de  fronteira  k  obtidas  pelo  fluxo  de  seqüência  positiva;

*Pk*\*,*Q*\*, as  potências  ativa  e  reativa  injetadas  na  barra

*k*

de  fronteira  k  obtidas  pelo  fluxo  de  potência  trifásico

para  a  subrede,  conforme  passo  5  de  4.1;

*Pki* ,*Qki* , os  fluxos  de  potência  ativa  e  reativa  no  ramo

k-i,  i  pertencente  a  Ω*i*  ,  obtidos  pelo  fluxo  de

seqüência  positiva,  conforme  o  passo  1  de  4.1;

**Thank you for using Wondershare PDFelement.**

**You can only convert up to 5 pages in the trial version.**

**To get the full version， please purchase the program here:**

[*http://cbs.wondershare.com/go.php?pid=973&m=db*](http://cbs.wondershare.com/go.php?pid=973&m=db)