**GPC/014**

**21  a  26  de  Outubro  de  2001**

**Campinas  -  São  Paulo  -  Brasil**

**GRUPO  V**

**PROTEÇÃO,  MEDIÇÃO  E  CONTROLE  EM  SISTEMAS  DE  POTÊNCIA**

**IMPLEMENTAÇÃO  DE  ALGORITMO  DIGITAL  DE  PROTEÇÃO**

**PARA  PERDA  DE  EXCITAÇÃO  EM  GERADORES  SÍNCRONOS**

Marco  Paulo  Delboni  (\*)

PROTLab/LRC/UFMG

RESUMO

Este  trabalho  apresenta  os  aspectos  fundamentais

relacionados  à  filosofia  de  aplicação  da  proteção  para

perda  de  excitação  em  geradores  síncronos,  bem

como  o  desenvolvimento  de  um  software  para

aplicação  de  relé  digital  de  distância  para  a  proteção

contra  perda  de  excitação  (ANSI  40).

PALAVRAS-CHAVE:  Proteção  digital,  Proteção  de

Geradores,  Proteção  para  Perda  de  Excitação.

1.0  -  INTRODUÇÃO

Quando  um  gerador  síncrono  perde  a  excitação,  tende

a  operar  como  um  gerador  de  indução.  Nesta

condição,  para  suprir  a  falta  de  excitação,  absorve

potência  reativa  (MVAr)  do  sistema.  Este  dreno  de

reativo  imposto  pela  máquina  ao  sistema  é,  sem

dúvida, a principal característica da perda de

excitação,  podendo  atingir  a  valores  elevados,  na  faixa

de  2  a  4  vezes  a  potência  aparente  nominal  da

máquina  [1].

Sob  o  ponto  de  vista  do  gerador,  a  operação  na

condição  de  perda  de  excitação  pode  vir  a  causar

sérios  danos,  devido  a:

•  Sobreaquecimento  dos  enrolamentos  do  estator,

causado  pelo  alto  valor  de  corrente  produzido  pela

absorção  de  potência  reativa,  associada  ao  baixo

valor  da  tensão  terminal  da  máquina.

•  Elevado  aquecimento  do  corpo  do  rotor  e  anéis  de

retenção,  devido  às  correntes  induzidas  pelo  estator.

•  Elevado  aquecimento  das  extremidades  do  núcleo

do  estator,  causado  pelo  aumento  do  enlace  de  fluxo

devido  à  condição  de  baixa  excitação,  podendo

rapidamente  ultrapassar  ao  limite  estabelecido  pelo

fabricante  e  incorporado  à  curva  de  capabilidade  da

máquina.

Clever  Pereira

PROTLab/LRC/UFMG

Quanto  ao  Sistema  Elétrico  de  Potência,  o  grande

dreno  de  reativo,  imposto  pela  máquina  operando  sem

excitação,  pode  ter  como  conseqüências:

•  Colapso  de  tensão  e  instabilidade

•  Sobrexcitação  das  máquinas  vizinhas,  para  suprir  a

demanda  de  reativo  requerida  pelo  gerador  sob

condição  de  perda  de  excitação.

2.0  -  FILOSOFIA  OPERACIONAL  DA  PROTEÇÃO

PARA  PERDA  DE  EXCITAÇÃO

2.1  -  Variação  da  Pot ê ncia Ativa, Reativa  e Tens ã o

Terminal sob Condi çã o de Perda de Excita çã o

A  Figura  1  mostra  a  variação  típica  de  P,  Q  e  V  para

um  gerador,  na  condição  de  perda  de  excitação.  A

máquina  já  se  encontrava  operando  subexcitada

quando  da  perda  do  campo,  passando  então  a

aumentar  significativamente  esta  absorção.  Caso  a

máquina          estivesse          inicialmente          operando

sobrexcitada,  o  fornecimento  de  reativo  para  o  sistema

iria  diminuir  progressivamente,  passando  a  máquina  a

absorver  reativo  em  um  determinado  instante.  O  dreno

de  reativo,  por  sua  vez,  força  uma  significativa

diminuição  da  tensão  terminal  da  máquina.  O

comportamento      do      gerador      se      aproxima      do

comportamento  de  um  gerador  de  indução.  Esta

situação  perdura  até  que  o  ângulo  do  rotor  atinge  o

valor  limite  de  estabilidade  e  o  gerador  perde  o

sincronismo  com  o  restante  do  sistema.  Neste

instante,  ocorre  uma  diminuição  brusca  da  potência

ativa  fornecida  pelo  gerador  que,  juntamente  com  a

potência  reativa  e  a  tensão  terminal,  se  tornam

oscilantes,  em  torno  de  um  valor  médio,  a  uma

freqüência  dupla  do  escorregamento.  Este  ponto  é

claramente  identificado  na  Figura  1,  ocorrendo,  para  o

caso  simulado,  cerca  de  4,5  segundos  após  a  perda

da  excitação.  A  máquina  passa  então  a  operar  de

**LRC/UFMG  –  Núcleo  de  Desenvolvimento  Científico  e  Tecnológico  em  Descargas  Atmosféricas**

Av.  Antônio  Carlos,  6627  -  CEP  31.270-901  -  Pampulha  -  Belo  Horizonte  -  MG  -  Brasil

Fone/Fax:  +55  (031)  3499  4872  -  delboni@gold.com.br  -  clever@cpdee.ufmg.br

modo  assíncrono,  fornecendo  uma  potência  ativa

reduzida,  absorvendo  um  valor  alto  de  potência  reativa

e  operando  com  a  tensão  terminal  significativamente

reduzida.

adequadamente,      através      da      monitoração      da

impedância  vista  dos  terminais  da  máquina,  uma

condição  de  operação  qualquer  (normal  ou  não)  de

uma  condição  de  perda  de  excitação.

*FIGURA 1 – Variação típica de P, Q e V de um gerador na*

*condição de perda de excitação.*

2.2  -  Impedância  Aparente  Representativa  da

Condição  de  Perda  de  Excitação

Considerando-se  os  valores  de  P,  Q  e  V  em  um

instante qualquer, a impedância aparente

correspondente,  na  forma  cartesiana,  é  expressa  por:

*PV* 2

*R*  = (1)

*P*2  +*Q*2

e

*QV* 2

*X*  = (2)

*P*2  +*Q*2

Esta  impedância  reflete  com  fidelidade  as  variações

das  grandezas  elétricas  envolvidas  na  perda  de

excitação.  Deve  ser  observado  que  a  variação  destas

grandezas  é  um  fenômeno  trifásico  equilibrado.  Deste

modo,  a  transformação  da  potência  ativa  e  reativa  em

impedância  aparente,  plano  PQ  para  o  plano  RX,  é

expressa  diretamente  pelas  equações  anteriores.

2.3  -  Proteção  Atualmente  Utilizada

A  proteção  para  perda  de  excitação  mais  utilizada

atualmente  é  baseada  na  transformação  PQ  =>  RX  e

foi  proposta  inicialmente  por  C.  R.  Mason  no  final  da

década  de  40  [2],  tendo  incorporado,  desde  então,

modificações  em  sua  forma  original  [3].  Consta

basicamente  de  um  relé  de  distância  monofásico,

especialmente  projetado  para  a  função  de  perda  de

excitação  (ANSI  40),  composto,  em  sua  forma  mais

completa, por duas unidades de admitância

deslocadas  (offset  mho)  e  temporizadores,  como

mostra  a  Figura  2.  A  proteção  é  capaz  de  distinguir

*FIGURA 2 – Plano RX mostrando ajustes da proteção ANSI*

*40.*

Para  geradores  com  reatância  síncrona  de  eixo  direto

(*Xd*)  até  1,2  pu,  utiliza-se  apenas  uma  unidade  de

admitância,  com  diâmetro  igual  à*Xd*.  No  caso  de

geradores  com*Xd*  >  1,2  pu,  o  diâmetro  da  unidade

interna  (*Z1*)  é  limitado  em  1,0  pu.  Em  ambos  os  casos

o  deslocamento  (offset)  é  igual  à  metade  da  reatância

transitória  de  eixo  direto  (*X’d*).

3.0  -  ESTIMAÇÃO  DA  IMPEDÂNCIA  APARENTE

3.1  -  Algoritmo  de Estimação  Utilizado

Para  que  a  perda  de  excitação  seja  detectada,  é

necessário  que  a  impedância  aparente  representativa

desta  condição  seja  corretamente  interpretada  pela

proteção,  a  cada  instante.  O  relé  de  proteção  deve

então  ser  capaz  de  monitorar  a  trajetória  desta

impedância  ao  longo  do  tempo,  disparando  o  processo

para  anular  os  efeitos  danosos  da  perda  de  excitação.

Isto  é  conseguido  através  de  um  algoritmo  de

estimação  implementado  no  relé.

O  desempenho  de  um  algoritmo  de  estimação,

também      denominado      filtro      de      estimação      ou

simplesmente  filtro  (não  confundir  com  o  filtro  “anti-

aliasing”)     está  intimamente     relacionada     com     o

ambiente  ao  qual  é  agregado,  em  particular  à  função

de     proteção     associada.     Certas     peculiaridades,

inerentes       a       determinada       anormalidade,       são

importantes  na  definição  do  algoritmo  de  estimação  a

ser  implementado.  No  caso  da  perda  de  excitação,  as

seguintes  características,  são  importantes  para  a

escolha  deste  algoritmo:

•  A  perda  de  excitação  é  um  fenômeno  relativamente

lento,  principalmente  quando  comparado  a  um

curto-circuito.  A  máquina  leva,  tipicamente,  de  2  a  7

segundos  para  perder  o  sincronismo,  na  condição  de

carregamento inicial elevado. Para baixo

carregamento  inicial,  este  tempo  é  bem  maior.

•  É  de  característica  trifásica  equilibrada,  com  forma

de  onda  de  tensão  e  corrente  predominantemente

senoidal  na  freqüência  fundamental,  pelo  menos  até

a  máquina  perder  o  sincronismo  com  o  sistema.

Diversos filtros para estimação da impedância

aparente  foram  desenvolvidos  durante  a  década  de  70,

tendo  como  objetivo  sua  aplicação  na  proteção  digital

de  linhas  de  transmissão.  Dentre  estes  algoritmos

estão  os  denominados  algoritmos  de  ajuste  à  curva

senoidal.

Estes  algoritmos  partem  do  princípio  que  os  sinais

analógicos  de  entrada  são  da  forma

Harmônicos  de alta  freqüê ncia gerados  por

Saturação  de  transformadores  de  corrente  (TC’s)  –

normalmente  a  perda  de  excitação  não  implica  em

correntes  muito  elevadas,  como  as  geradas  por

curtos-circuitos.  Também  os  relés  digitais  impõem

um  baixo  “burden”  aos  redutores  de  medida.  TC’s

corretamente  aplicados  não  apresentam  problemas

de  saturação  na  condição  de  perda  de  excitação.

Variação  brusca  de  tensão  em  transformadores  de

potencial  (TP’s)  –  afeta  de  modo  significativo

apenas  os  TP’s  capacitivos  (TPC’s).  De  modo  geral

as  proteções  localizadas  no  lado  da  máquina  nas

unidades  geradoras  são  alimentadas  através  de

TP’s  eletromagnéticos.  Além  disso,  a  perda  de

excitação  é  um  fenômeno  relativamente  lento,  não

apresentando  variação  brusca  significativa  de

tensão.

Curto-circuito  externo  –  como  já  comentado,  a

proteção  para  perda  de  excitação  não  é  afetada

pelas  faltas  externas.  Além  disso,  os  harmônicos

presentes  nestas  condições  são  de  curta  duração.

*y*(*t*)  =*Yp*  sen(ω0*t*  +  φ)

(3)

Componentes  de  baixa freq üência

A  perda  de  sincronismo  da  máquina  na  condição  de

Para  aplicação  em  proteção  de  linhas  de  transmissão,

estes  algoritmos  têm  atualmente  apenas  valor  didático,

devido  principalmente  à  sua  baixa  imunidade  à

componente  exponencial  e aos sinais de alta

freqüência,  presentes  durante  curtos-circuitos.  Devido

à  característica  predominantemente  senoidal  da  perda

de  excitação,  um  destes  filtros,  denominado  algoritmo

de  ajuste  à  curva  senoidal  com  janela  de  dados  de  3

amostras  [4,5,6,7]  é  implementado  e  avaliado  no

presente trabalho. A lógica de detecção é

implementada através de um comparador de

amplitude.

3.2  -  Principais Fontes  de  Erro

Por  uma  série  de  razões,  algumas  das  quais

analisadas  a  seguir,  os  sinais  de  entrada  nem  sempre

podem  ser  considerados  puramente  senoidais.  A

expressão  (3)  é  mais  corretamente  apresentada  como

perda  de  excitação  é  caracterizada  pelo  aparecimento

de  uma  componente  de  baixa  freqüência  (duas  vezes

o  escorregamento).  A  proteção  é  prevista  para  operar

antes  que  a  máquina  venha  a  perder  o  sincronismo.

Além  disso,  esta  componente  é  de  baixa  intensidade  e,

geralmente,  não  impede  a  operação  do  relé.

Presenç a, na  mesma  janela  de  dados, de sinais

anteriores e posteriores ao  início do distúrbio.

Os  algoritmos  de  estimação  geralmente  trabalham

com      um      determinado      número      de      amostras

consecutivas  dos  sinais  de  entrada,  descartando  a

mais  antiga  sempre  que  uma  nova  amostragem  é

executada.  Este  conjunto  de  amostras  constitui  a

chamada  janela  de  dados.  Desta  maneira,  sempre  que

ocorre  o  distúrbio,  durante  um  certo  período,  uma

mesma  janela  de  dados  conterá  amostras  coletadas

antes  e  após  o  início  do  distúrbio  de  interesse,  o  que

pode      dificultar      uma      detecção      adequada      da

*y*(*t*)  =*Yp*  sen(ω0*t*  +  φ)+  ε(*t* )

(4)

anormalidade.  O  período  em  que  isto  ocorre  é  função

do  tamanho  da  janela  utilizada  pelo  estimador  e  da

taxa  de  amostragem.  A  perda  de  excitação  é  um

onde  ε(*t*)  representa  o  erro  (ou  ruído)  devido  a  se

considerar  o  sinal  como  sendo  puramente  senoidal  e

todos  os  demais  possíveis  erros  de  estimação.

Os  principais  erros  e  suas  fontes  são  analisados  a

seguir.

Componente exponencial  presente  na  corrente de falta

Devido  ao  seu  posicionamento  no  plano  RX,  a

proteção  para  perda  de  excitação  é,  praticamente,

imune  a  faltas  externas.  Deve  ser  ressaltado  também

que  o  tempo  de  atuação  mínimo  do  relé  40  é  cerca  de

250  ms  e  a  constante  de  tempo  típica  da  componente

exponencial  se  situa  na  faixa  de  30  a  40  ms.

fenômeno  relativamente  lento,  não  sendo  o  tempo  de

atuação  crítico  o  suficiente  para  tornar  significativo

este  tipo  de  erro.

Componentes (hardware)  do  relé  digital

Os  mais  importantes  são  os  devidos  à  conversão  A/D

e  aos  filtros  (“group  delay”).  Atualmente,  devido  ao

avanço  tecnológico  na  área  de  “*hardware*”,  estes  erros

contribuem  muito  pouco  para  o  erro  total  de  estimação.

Da  análise  efetuada,  pode  se  concluir  que  a  proteção

de  distância  aplicada  à  perda  de  excitação  é  bem

menos  suscetível  a  certos  tipos  de  erros  do  que

quando  aplicada  à  proteção  de  linhas  de  transmissão.

No  entanto,  uma  boa  seletividade  para  a  freqüência

**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)