

JORGE LUIZ DE ARAUJO JARDIM

ANÁLISE E PROJETO DE EXCITATRIZES ESTÁTICAS

TESE APRESENTADA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA PUC/RJ COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ORIENTADOR: CARLOS TÉRSIO CORREIA DA SILVA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

RIO DE JANEIRO, 06 DE FEVEREIRO DE 1987.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Têrsio Correia da Silva, pelo incentivo e orientação dispensados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao engº e amigo Antônio Guilherme Garcia Lima pelo material bibliográfico e excelente co-orientação deste trabalho.

Ao amigo Carlos Afonso Pacheco Campos pelo apoio técnico na montagem dos circuitos eletrônicos.

RESUMO

Os sistemas de potência são projetados para operarem com tensão e frequência constantes, admitindo-se pequenas variações em torno de seus valores nominais. Estas grandezas são controladas principalmente pelos sistemas de excitação e reguladores de velocidade, respectivamente.

Esta dissertação examina o projeto de sistemas de excitação modernos e estabelece as características de projeto dos componentes das excitatrizes estáticas. Os principais componentes (conversor, circuito de disparo, circuito de partida e regulador de tensão) são implementados em um protótipo de excitatriz.

As respostas do protótipo a pequenas e grandes perturbações também são discutidas.

ABSTRACT

Power systems are designed to operate with constant voltage and frequency, allowing small signal variations around its rated values. These quantities are mainly controlled by excitation systems and governors, respectively.

This dissertation examines the design of modern excitation systems and establishes the desired characteristics of static exciter components. The main components (converter, firing circuit, starting circuit and voltage regulator) are implemented in a exciter prototype.

The prototype response to small and large disturbances are also discussed.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
CAPÍTULO 1	1
1.1. Introdução	1
1.2. Evolução dos Sistemas de Excitação	3
1.3. Objetivo do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 TIPOS DE SISTEMA DE EXCITAÇÃO	6
2.1. Classificação dos Sistemas de Excitação	6
2.2. Auto-Excitação Direta	7
2.3. Excitação Composta	10
2.4. Auto-Excitação Indireta	12
2.5. Sistema de Excitação Independente Direta	13
2.6. Excitação Independente Indireta	14
2.7. Resumo	15
CAPÍTULO 3 - COMPONENTES DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO	18

CAPÍTULO 4 - CIRCUITOS RETIFICADORES	25
4.1. Introdução	25
4.2. Considerações Preliminares	27
4.2.1. Transformador de excitação	30
4.2.2. Conversor de excitação	35
4.3. Retificador Trifásico de Onda Completa	38
4.4. Harmônicos do Lado C.A.	44
4.5. Regulação e Queda de Tensão	48
4.5.1. Comutação	49
4.5.2. Outras perdas	50
4.6. Correntes de Falta	51
4.6.1. Transitório de curto-circuito para um circuito RL	53
4.6.2. Falta C.C. ou externa	56
4.6.3. Falta C.A. ou falta interna	59
4.7. Aquecimento e Refrigeração	63
4.7.1. Resistência térmica de regime permanente	63
4.7.2. Resistência térmica transitória	65
4.7.3. Dimensionamento	66
4.8. Sistema de Refrigeração	69
4.8.1. Refrigeração natural ou por convecção	69
4.8.2. Refrigeração forçada	70
4.9. Considerações Finais	70
 CAPÍTULO 5 - CIRCUITOS DE DISPARO	 71
5.1. Introdução	71
5.2. Métodos de Disparo de Cruzamento por Coseno	72
5.3. Método de Disparo de Cruzamento por Rampa	76
5.4. Pulsos de Disparo	78
5.5. Princípio de um Circuito Gerador de Pulso	79

5.6. Controle dos Limites de Ângulo de Disparo	82
5.7. Circuito de Isolamento de Pulso	84
5.7.1. Arranjos dos circuitos isoladores de pulso	85
 CAPÍTULO 6 - PROTEÇÃO E MONITORAÇÃO	 89
6.1. Introdução	89
6.2. Proteção de Sobretensões	91
6.2.1. Transitórios com origem no circuito primário do transformador de excitação	92
6.2.2. Transitórios gerados no lado do rotor	93
6.2.2.1. Disjuntor de campo	100
6.2.2.2. Resistor de descarga	102
6.2.2.3. Proteção contra sobretensões	104
6.2.3. Transitórios com origem interna à ponte	106
6.2.3.1. Tensão de arco do fusível de proteção	106
6.2.3.2. Transitório de comutação	107
6.2.3.3. Circuito amortecedor	108
6.3. Limitação de Corrente	114
6.4. Sistemas de Monitoração	114
6.4.1. Monitoração da ponte	114
6.4.1.1. Monitoração dos pulsos de disparo	115
6.4.1.2. Conseqüências das falhas de pulso	116
6.4.1.3. Possíveis pontos para monitoração de pulsos	118
6.4.2. Monitoração de condução	119
6.4.3. Monitoração do sistema de refrigeração	121
6.5. Proteção de Sobrecorrente Instantânea	122
6.6. Fusíveis para Tiristores	122

CAPÍTULO 7 - CONTROLE DA EXCITAÇÃO	127
7.1. Introdução	127
7.2. Regulador de Tensão	127
7.2.1. Elementos de medição	132
7.2.2. Controlador	132
7.3. Compensador de Corrente Reativa	138
7.4. Limitadores	142
7.4.1. Limitadores de subexcitação	144
7.4.1.1. Limitador de ângulo do rotor	144
7.4.1.2. Limitador de mínima excitação	148
7.4.2. Limitador de corrente de campo	151
7.4.3. Limitador da corrente de estator	152
7.5. Sinais Adicionais Estabilizantes	153
 CAPÍTULO 8 - PROJETO E MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO DE EXCITATRIZ ESTÁTICA	 162
8.1. Introdução	162
8.2. Circuito Conversor	163
8.3. Circuito de Disparo	169
8.4. Regulador de Tensão	170
8.5. Testes de Desempenho	170
8.5.1. Testes de resposta ao degrau	171
8.5.2. Aplicação e rejeição de carga indutiva	177
8.5.3. Aplicação e rejeição de carga capacitiva	182
8.5.4. Testes de curto-circuito	187
8.5.5. Testes de energização inicial do campo e desenergização	190
 CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS	 193

APÊNDICE I - DADOS DO GERADOR	196
APÊNDICE II - DADOS DO TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO	204
APÊNDICE III - DADOS DO TIRISTOR	206
APÊNDICE IV - DIAGRAMA DOS CIRCUITOS DE CONTROLE	210
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	216

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Diagrama simplificado dos sistemas de controle de um gerador síncrono	2
Figura 2.1	- Classificação dos sistemas de excitação segundo a origem da energia primária	6
Figura 2.2	- Auto-excitação direta	9
Figura 2.3	- Característica de proteção com fusível para um sistema com auto-excitação simples	10
Figura 2.4	- Sistema de excitação composto	11
Figura 2.5	- Auto-excitação indireta	13
Figura 2.6	- Sistema com excitação independente direta	14
Figura 2.7	- Sistema de excitação independente indireta	15
Figura 3.1	- Componentes de um sistema de excitação estático	19
Figura 3.2	- Excitatriz estática com controle manual	23
Figura 3.3	- Arranjo de controle manual com canal duplo	24
Figura 4.1	- Retificador monofásico controlado de onda completa	25
Figura 4.2	- Retificadores trifásicos controlados: a) de onda completa; b) de meia onda	27
Figura 4.3	- Resposta de um sistema de excitação	29

Figura 4.4	- Variações no tempo de tensões e correntes na ponte retificadora trifásica	41
Figura 4.5	- Forma de onda da corrente de linha do lado secundário do transformador de excitação com ligação Y-Y	46
Figura 4.6	- Forma de onda da corrente de linha do lado primário do transformador de excitação com ligação Y- Δ	47
Figura 4.7	- Comutação de ramos em uma ponte retificadora trifásica	49
Figura 4.8	- Configuração RL	53
Figura 4.9	- Fator transitório de pico para $\theta = 0^\circ$	55
Figura 4.10	- Fatores transitórios para $\theta = 0^\circ$	56
Figura 4.11	- Falta externa numa ponte trifásica	56
Figura 4.12	- Simplificação do circuito trifásico para estudos de curto-circuito	58
Figura 4.13	- Falta interna	60
Figura 4.14	- Formas de onda de correntes e tensões	60
Figura 4.15	- Fatores transitórios para tiristores defeituosos	62
Figura 4.16	- $I^2 \cdot t$, senoidal meia onda ($\omega L/R = 10$)	62
Figura 4.17	- Circuito térmico equivalente de um <u>ti</u> ristor	64
Figura 4.18	- Circuito elétrico equivalente da resistência térmica	65
Figura 4.19	- Resposta do circuito elétrico equivalente para variação de corrente em degrau	66
Figura 5.1	- Princípio básico do método de controle de cruzamento por coseno	73
Figura 5.2	- Relação fasorial das cosenóides de sincronização para um retificador de 3 pulsos	74
Figura 5.3	- Relação fasorial das cosenóides de sincronização para um retificador de 6 pulsos	77
Figura 5.4	- Método de disparo de cruzamento por rampa	77

Figura 5.5	- Característica de arcoseno obtida a partir de segmentos de reta	78
Figura 5.6	- Diagrama fasorial simplificado de um gerador de pulso usando o princípio de cruzamento por coseno	80
Figura 5.7	- Princípio de funcionamento do método de cruzamento por coseno	81
Figura 5.8	- Diagrama fasorial simplificado de um gerador de pulso pelo princípio de cruzamento por rampa	82
Figura 5.9	- Estágio de saída do circuito simples de isolamento de pulso	85
Figura 5.10	- Representação simplificada de um estágio de saída de pulso, utilizando oscilador de alta frequência	87
Figura 5.11	- Representação simplificada do estágio de saída de pulsos utilizando um único oscilador para todos os canais de saída	88
Figura 6.1	- Sistema de desexcitação e proteção de campo	97
Figura 6.2	- Procedimento para desexcitação do gerador: a) operação normal; b) início da descarga; c) desexcitação	99
Figura 6.3	- Processo de extinção da corrente de campo	102
Figura 6.4	- Descarga da corrente de campo para um resistor linear	103
Figura 6.5	- Característica típica do resistor variável com a tensão	104
Figura 6.6	- Circuito de proteção contra sobreensões no campo	105
Figura 6.7	- Curva característica do SUS	105
Figura 6.8	- Operação do fusível	106
Figura 6.9	- Transitórios cíclicos de tensão devido ao corte de corrente de recuperação	108
Figura 6.10	- Circuitos amortecedores para uma ponte trifásica	109
Figura 6.11	- Tensão inversa inicial	110
Figura 6.12	- Circuito equivalente de comutação	111

Figura 6.13 - Corrente de recuperação reversa	111
Figura 6.14 - Tensão inversa elevada	113
Figura 6.15 - Monitoração de condução	121
Figura 6.16 - Utilização de fusíveis em conversora	124
Figura 6.17 - Ação de limitação de corrente do fusível	125
Figura 7.1 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema de controle da excitação	128
Figura 7.2 - Resposta no tempo típico de um sistema de controle da excitação para uma entrada de variação em degrau na referência do regulador	130
Figura 7.3 - Diagrama de blocos do circuito de medição	132
Figura 7.4 - Diagrama de blocos representativos da dinâmica dos elementos de um sistema de controle de excitação com um gerador em vazio	133
Figura 7.5 - Lugar das raízes do sistema da Figura 7.4 tendo em vista valores típicos para as constantes de tempo	134
Figura 7.6 - Diagrama de ganho de resposta em frequência para o conjunto medição e gerador em vazio	135
Figura 7.7 - Controlador proporcional integral	136
Figura 7.8 - Função avanço-atraso para ajuste do ganho transitório	137
Figura 7.9 - Característica de resposta em frequência do ganho de malha aberta do conjunto controlador, medição e gerador em vazio	137
Figura 7.10 - Característica de queda da tensão de referência em função da potência reativa, para um gerador acoplado a uma rede ativa	139
Figura 7.11 - Característica de compensação de corrente reativa positiva, para um gerador acoplado a uma rede ativa através de um transformador	140
Figura 7.12 - Esquema simplificado da implementação de um compensador de corrente reativa com um circuito monofásico	141

Figura 7.13 - Curvas de capacidade de um gerador	143
Figura 7.14 - Princípio de determinação do ângulo do rotor: a) diagrama vetorial; b) circuito de medição	145
Figura 7.15 - Característica do circuito lógico para obtenção do ângulo de carga	147
Figura 7.17 - Seletor de máximo	148
Figura 7.17 - Característica do limitador de subexcitação	149
Figura 7.18 - Circuito do limitador de subexcitação	150
Figura 7.19 - Limitador de corrente máxima de campo	152
Figura 7.20 - Componentes básicos de um sinal adicional estabilizador	155
Figura 7.21 - Transdutor de desvio de frequência: a) diagrama de blocos; b) formas de ondas ilustrativas da operação do transdutor	157
Figura 7.22 - Relação típica entre a posição do distribuidor de uma turbina hidráulica e a potência gerada resultante	158
Figura 7.23 - Diagrama de blocos representativo do circuito sintetizador da potência transmitida ao eixo de um gerador síncrono através de uma turbina hidráulica	158
Figura 7.24 - Sintetização do sinal de potência mecânica a partir da potência elétrica e da frequência	159
Figura 7.25 - Estrutura básica de um estabilizador	159
Figura 8.1 - Resposta ao degrau para um ganho de 5 p.u./p.u.	173
Figura 8.2 - Retorno a condição nominal com o ganho de 5 p.u./p.u.	174
Figura 8.3 - Resposta ao degrau com o ganho de 40 p.u./p.u.	175
Figura 8.4 - Resposta ao degrau com o ganho de 140 p.u./p.u.	176
Figura 8.5 - Aplicação de carga indutiva com o ganho de 40 p.u./p.u.	178
Figura 8.6 - Rejeição de carga indutiva com o ganho de 40 p.u./p.u.	179

Figura 8.7	- Aplicação de carga indutiva com o ga- nho de 140 p.u./p.u.	180
Figura 8.8	- Rejeição de carga indutiva com o ga- nho de 140 p.u./p.u.	181
Figura 8.9	- Aplicação de carga capacitiva com o ganho de 40 p.u./p.u.	183
Figura 8.10	- Rejeição de carga capacitiva com o ga- nho de carga de 40 p.u./p.u.	184
Figura 8.11	- Aplicação de carga capacitiva com o ganho de 140 p.u./p.u.	185
Figura 8.12	- Rejeição de carga capacitiva com o ga- nho de 140 p.u./p.u.	186
Figura 8.13	- Curto-circuito duplo com duração de 150 ms cada	188
Figura 8.14	- Curto-circuito com duração de 150 e 200 ms	186
Figura 8.15	- Partida do sistema de excitação a par- tir de tensão residual do estator	192
Figura 8.16	- Desenergização de campo pelo bloqueio dos pulsos de disparo da ponte conver- sora	192
Figura I.1	- Curvas de saturação em vazio e em cur- to-circuito	199
Figura I.2	- Circuitos equivalentes de eixo d e q	201
Figura IV.1	- Circuito comparador	211
Figura IV.2	- Controlador PI	212
Figura IV.3	- Acoplador	213
Figura IV.4	- Circuito de disparo	214
Figura IV.5	- Circuito conversor e de partida	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Resumo das características dos sistemas de excitação	17
Tabela 7.1	- Índices de desempenho dos sistemas de excitação	131

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Minúsculas

- e_a, e_b, e_c - tensão instantânea nas fases a, b e c do gerador
- e_d, e_q - componentes de eixo direto e quadratura da tensão de armadura
- e_{arc} - tensão inversa através do arco entre eletrodos do disjuntor de campo durante a sua abertura
- e_{ch} - tensão através do disjuntor de campo durante a sua abertura
- e_{fd} - tensão nos terminais do enrolamento de campo
- e_p - tensão instantânea entre fases no primário do transformador de excitação
- e_s - tensão instantânea entre fases no secundário do transformador de excitação
- e_{sin_i} - tensão instantânea de sincronização de disparo do tiristor i
- e_t - tensão eficaz nos terminais do gerador

- e_{teto} - tensão de teto da fonte de excitação
- e_{ref} - tensão terminal de referência para o regulador de tensão
- i_a, i_b, i_c - valor instantâneo das correntes nas fases a, b e c
- i_o - valor instantâneo da corrente na carga do conversor
- $\hat{i}_{af}$ - corrente de pico no tiristor durante uma falta interna
- $\hat{i}_{ar}$ - corrente de pico resultante da soma das correntes nos ramos não defeituosos durante uma falta interna
- $\hat{i}_{as}$ - corrente de pico por fase no primeiro ciclo durante uma falta externa
- i_{as} - corrente média por fase durante uma falta externa
- i_e - corrente no resistor de descarga de campo
- i_f - corrente instantânea no fusível
- i_{fd} - corrente no enrolamento de campo
- i_{fd_0} - corrente no enrolamento de campo em vazio
- i_{fd_1} - corrente no enrolamento de campo para tensão e potência nominais
- $i_1, i_2, \dots, i_6$ - corrente instantânea nos ramos do retificador
- q - número de pulsos do retificador
- r - resistência de armadura
- r_{fd} - resistência do enrolamento de campo

- t_a - tempo de arco
- t_c - tempo de interrupção
- t_m - tempo de fusão
- x_{ad} - reatância mútua entre os enrolamentos de eixo direto
- x_d, x_q - reatâncias de eixo direto e quadratura
- x'_d - reatância transitória de eixo direto
- x''_d - reatância subtransitória de eixo direto

Letras Maiúsculas

- C_p - ultrapassagem máxima
- E_c - tensão de controle do regulador
- E_d - tensão média máxima na carga
- E_{do} - tensão média na carga
- E_{exc} - tensão nos terminais da ponte retificadora de excitação
- E_{fd} - tensão de campo
- E_{kmax} - tensão direta ou reversa máxima que o tiristor deve suportar
- E_{max} - tensão de pico da fonte C.A.
- E_p - tensão atrás da reatância de Potier
- E_R - tensão eficaz no circuito de carga do retificador

- E_{RI} - tensão de ondulação na saída do retificador
- E_{RRM} - tensão de pico repetitiva máxima
- E_S - tensão eficaz entre fases no secundário
- $\hat{E}_{SIN}$ - valor de pico da tensão de sincronização
- E_X - valor médio da queda de tensão devido a reatância de dispersão do transformador
- I_a - corrente eficaz de linha no secundário do transformador de excitação
- I_C - sinal de corrente do compensador de reativo
- I_d - valor médio da corrente na carga do retificador
- $\hat{I}_{dS}$ - corrente de pico total de uma falta externa
- I_{dS} - corrente de curto-circuito média total de uma falta externa
- I_P - corrente de pico no circuito amortecedor
- I_K - corrente média por tiristor numa ponte trifásica
- I_R - valor eficaz da corrente de carga do retificador
- I_{RI} - corrente de ondulação na carga do retificador
- I_{RR} - corrente eficaz por tiristor
- I_{RN} - valor eficaz do n-ésimo harmônico da corrente de carga do retificador
- K - ganho do regulador de tensão

- K_E - fator de ondulação de tensão
- K_I - fator de ondulação de corrente
- $K(I^2 \cdot t)$ - coeficiente de $I^2 \cdot t$ do primeiro ciclo após uma falta no retificador
- $K(\text{Médio})$ - coeficiente de corrente média do primeiro ciclo após um curto-circuito num circuito RL
- K_p - coeficiente de corrente de pico do primeiro ciclo de um curto-circuito no retificador
- K_S - fator de pico para falta interna
- K_V - fator de segurança de tensão
- L - indutância de carga
- L_f - impedância da fonte de alimentação do retificador
- L_{ffd} - indutância de campo
- P - número de tiristores em paralelo
- P_0 - potência no circuito de carga do retificador
- P_S - potência no secundário do transformador de excitação
- Q_{rr} - carga de recuperação do tiristor
- R - resistência de carga
- R_E - resistência de descarga de campo
- R_F - resistência da fonte de C.A. do retificador
- R_{fd} - resistência de campo

- R_t - resistência térmica da junção para o meio ambiente
- R_{td} - resistência térmica do dissipador
- R_{thc} - resistência térmica da junção para a cápsula do tiristor
- R_{tjo} - resistência térmica da junção
- S - número de tiristores em série por ramo da ponte
- T_c - temperatura da cápsula do tiristor
- T_e - constante de tempo da excitatriz
- T_E - constante de tempo efetiva de campo durante a desexcitação
- T_d' - constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo direto
- T_d'' - constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo direto
- T_{do}' - constante de tempo transitória de circuito-aberto de eixo direto
- T_I - constante de tempo do integrador
- T_j - temperatura da junção do tiristor
- T_{jmax} - temperatura máxima permissível na junção
- T_{kd} - constante de tempo do enrolamento amortecedor de eixo direto
- T_m - constante de tempo de medição

T_{mr}	- temperatura do meio de refrigeração
T_r	- tempo de subida
T_s	- tempo de acomodação
ΔT_d	- diferença de temperatura do dissipador para o meio de refrigeração
ΔT_{jc}	- diferença de temperatura entre a junção e a cápsula do tiristor
ΔT_{jo}	- diferença de temperatura entre a cápsula do tiristor e o dissipador
ΔT_{sc}	- variação de temperatura de junção com uma sobrecarga
X_C	- reatância de dispersão do transformador de excitação
X_{CA}	- reatância da carga aplicada ao gerador
X_P	- reatância de Poitier
X_T	- reatância do transformador elevador
W	- potência dissipada
W_{RPD}	- potência de regime permanente direta
W_{RPR}	- potência de regime permanente reversa
Z_C	- impedância de comutação de fase
Z_{CA}	- impedância de carga aplicada ao gerador
Z_F	- impedância da fonte de C.A. do retificador

Letras Gregas

δ - ângulo de carga

ϕ - ângulo de fator de potência

ω - velocidade angular em radianos por segundo

ξ - coeficiente de amortecimento