

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AQUECEDOR DE ROLAMENTOS INDUTIVO

Área de Eletrônica de Potência

por

Carlos Eduardo Peçanha Alves

Marcus Vinicius Ataide, Mestre
Orientador

Geraldo Peres Caixeta, Doutor
Co-orientador

Itatiba (SP), novembro de 2004

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AQUECEDOR DE ROLAMENTOS INDUTIVOS

Área de Eletrônica de Potência

por

Carlos Eduardo Peçanha Alves

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Marcus Vinicius Ataíde, Mestre

Itatiba (SP), novembro de 2004

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	Error! Bookmark not defined.
LISTA DE FIGURAS	Error! Bookmark not defined.
LISTA DE TABELAS	Error! Bookmark not defined.
LISTA DE EQUAÇÕES	Error! Bookmark not defined.
RESUMO	Error! Bookmark not defined.
ABSTRACT	Error! Bookmark not defined.
1. INTRODUÇÃO	Error! Bookmark not defined.
1.1. OBJETIVOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
1.1.1. Objetivo Geral	Error! Bookmark not defined.
1.1.2. Objetivos Específicos	Error! Bookmark not defined.
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Error! Bookmark not defined.
2.1. TIRISTORES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.1.1. Características dos Tiristores	Error! Bookmark not defined.
2.2. CONTROLADORES DE TENSÃO CA	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3. PRINCIPIO DE CONTROLE DE FASE	6
4. TÉCNICAS DE CONROLE DE TIRISTORES	7
4.1. COMUTAÇÃO NATURAL	8
4.2. COMUTAÇÃO FORÇADA	9
5. CONTROLADORES MONOFÁSICOS COM CARGAS INDUTIVAS	10
5.1. PROTEÇÃO DOS TIRISTORES CONTRA di/dt e dv/dt	12
6. CIRCUITOS MAGNÉTICOS	14
7. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS	16
7.1. PERDAS NOS MATERIAIS MAGNÉTICOS	17
8. FUNCIONAMENTO EM C.A.	19
8.1. INTRODUÇÃO AO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO	21
9. PROJETO	22
9.1. CONTROLADOR DE TEMPERATURA	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
9.2. CONTROLE DE TENSÃO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
9.3. PROJETO DA BOBINA	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

9.4. FUNCIONAMENTO DO AQUECEDOR COM TODAS AS PARTES INTERLIGADAS.....	Error! Bookmark not defined.
9.5. VANTAGENS	Error! Bookmark not defined.
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	Error! Bookmark not defined.
REFÊNRENCIAS BIBLIOGRAFICAS....	Error! Bookmark not defined.
ANEXOS I – DATASHEET DE COMPONENTES	Error! Bookmark not defined.

LISTA DE ABREVIATURAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USF	Universidade São Francisco
Rpm	Rotações por minuto
VCC	Tensão Contínua
VCA	Tensão Alternada
VO	Tensão de Saída do Circuito
IO	Corrente de Saída do Circuito
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
RL	Resistor e Indutor
Fig.	Figura.
Eq.	Equação
Cap.	Capítulo
Irms	Corrente Eficaz
Vrms	Tensão Eficaz
Tap	Derivação entre o início e o fim de uma bobina ou indutor
GTOS	Tiristores de Desligamento pelo Gatilho
IGBTs	Transistores Bipolares de Porta Isolada
LC	Indutor + Capacitor
TRIAC	Tiristores Triodos Bidirecionais
SCR	Tiristor
Ni	Ampère espira
Pa	Potência Aparente
M-19	Tipo de Aço Silício
B	Indução Magnética
H	Intensidade do Campo Magnético
Pol	Unidade de Medida Polegada
COEL	Fabricante de Equipamentos de Controle (temperatura, pressão, etc).
mks	Unidade do Sistema Métrico Internacional, Metro kilo Segundo;
CI	Circuito Integrado
IT	Transformador de Pulso
Tab.	Tabela

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Símbolo do tiristor e as três junções <i>pn</i> : adaptado de Rashid Muhammad (1999).....	4
Figura 2 – Símbolo do tiristor e curva característica V-i: (a) Circuito; (b) Curva característica V-i.....	4
Figura 3 – Controle do Ângulo Monofásico: (a) circuito; (b) Formas de Onda.....	7
Figura 4 – Tempo de resposta da tensão e corrente após o disparo dos tiristores Th1 e Th2: adaptado de Siemens – Integrated Phase Control TCA 780 (a) Formas de onda 4.1a; (b) circuito 4.1b.....	9
Figura 5 – Controlador monofásico de onda completa com carga RL	11
Figura 6 – Circuitos de proteção contra dv/dt	13
Figura 7 – Circuito magnético simples.....	15
Figura 8 – Ciclo de histerese para Aço M-19, completamente processado.....	17
Figura 9 – Curva de perdas no núcleo e potência de excitação para aço M-19.....	18
Figura 10 – Característica $B_n = H_n$ e energia no campo magnético.....	18
Figura 11 – Ciclo de histerese simétrico: adaptado de Fitzgerald A.E. (1975).....	19
Figura 12 – Controlador de Temperatura.....	23
Figura 13 – Circuito interno do TCA 7480: adaptado de Siemens – Integrated Phase Control TCA 780.....	24
Figura 14 – Circuito de controle dos disparos dos tiristores: adaptado de Siemens Integrated Phase Control TCA 780	24
Figura 15 – Esquema Funcional do Aquecedor.....	26
Figura 16 – Aquecedor de Rolamentos Indutivo.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Controle prático para n mediadas de Rolamentos	27
--	----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	7
Equação 2	7
Equação 3	11
Equação 4	11
Equação 5	12
Equação 6	12
Equação 7	13
Equação 8	13
Equação 9	14
Equação 10	14
Equação 11	14
Equação 12	15
Equação 13	15
Equação 14	19
Equação 15	20
Equação 16	20
Equação 17	20
Equação 18	20
Equação 19	21
Equação 20	21
Equação 21	21
Equação 22	22

RESUMO

Peçanha Alves, Carlos. **Aquecedor de Rolamentos Indutivo**. Itatiba, 2004. no f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2004.

Aquecedor de Rolamentos indutivo é um projeto que tem a finalidade de aquecer rolamentos através de indução eletromagnética, é composto por uma bobina, um núcleo composto por ferro magnético, que irá induzir linhas de campo magnético no rolamento, isso faz com que ele aqueça e dilate, para que possa ser encaixado no eixo da máquina sem a necessidade de sofrer impacto. Será utilizado um controlador de temperatura ajustável e um circuito eletrônico para controlar os disparos de dois tiristores ligados antiparalelos, esses tiristores são ligados aos terminais da bobina, fazendo com que a tensão em seus terminais varie, para que possa variar o tempo de aquecimento do rolamento e ajustar a performance da máquina.

Palavras-chave: Aquecedor de rolamentos. Aquecedor Indutivo. Controle Potência.

ABSTRACT

Heater of inductive bearings is a project that will be used to heat up bearing through induction eletromagnetic, it is composed by a reel and a nucleus magnetic iron, that it will induce lines of field eletromagnetic in the bearing, that does with that he heats up and dilate, so that it can be inserted in the axis of it conspires without the need of suffering impacts. It will be used a controller of adjustable temperature and an electronic circuit to control the shots of two thyristors tied antiparallely those thyristors will be linked to the terminals of the reel, doing with that the tension in your terminals varies, he/she has the purpose of to vary the time of heating of the bearing and to adjust the performance of the equipment.

Keywords: *Bearing heater*1. *Inductive heater* 2. *Power Control* 3.

1. INTRODUÇÃO

O rolamento é um componente essencial em todo tipo de máquina. Através dele é possível que uma máquina tenha movimento, com o menor atrito possível e grande durabilidade, e é composto por dois anéis e entre eles são inseridas esferas, no anel interno em sua área externa possui um caminho ou “pista” e no anel externo esta “pista” fica do lado interno, desta forma a esfera pode circular por dentro desses anéis, sem o risco de sair, podendo trabalhar com velocidade até 18000 rpm. A preocupação no momento em que se vai colocar um rolamento novo é muito importante, em seu processo de fabricação são realizados testes individuais para cada rolamento, seja através do controle de medidas, ruídos e lubrificação. No momento em que for colocado, se o profissional utilizar técnicas como prensar ou bater no rolamento, todo aquele cuidado no processo de fabricação será perdido e a vida útil do rolamento diminuirá drasticamente.

O aquecedor de rolamento indutivo, tem a finalidade de melhorar e facilitar a montagem de rolamentos, a diferença da medida do eixo seja de qualquer máquina em relação ao diâmetro do rolamento é da ordem 0,1 a 0,5 mm maior, ou seja o diâmetro do eixo da máquina tem que ser maior que o diâmetro do rolamento, é necessário para que o rolamento fique travado no eixo, para evitar folgas axial e radial, quando o rolamento é aquecido pelo processo de indução magnética, seu diâmetro interno aumenta de 0,1 a 0,9 mm uniformemente, é possível assim colocar o rolamento por deslizamento no eixo, sem a necessidade de batê-lo e nem contaminar o rolamento com corpos estranhos (sujeira, partículas de metal).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é colocar em prática o conhecimento adquirido ao longo do curso de engenharia elétrica, contendo conceitos de várias disciplinas tais como: Eletrônica, Eletrônica de Potência, Eletromagnetismo, etc, para o projeto e construção do aquecedor de rolamentos indutivos. Assim é possível ter uma visão geral da elaboração de projetos e também de documentação do mesmo.

1.1.2. Objetivos Específicos

Durante o curso de Engenharia na Universidade São Francisco foram cursadas varias disciplinas sendo cada uma delas com ementas diferentes, para a elaboração do TCC, procurei atuar na eletrônica de potência, sendo uma disciplina que despertou grande interesse dentro da engenharia. Com o interesse em fazer o TCC nessa área se devem também a:

- Conhecer melhor sobre componentes utilizados na eletrônica de potência, bem como seus funcionamentos e controle;
- Procurar aprender ao máximo com o Orientador do TCC, principalmente por ter grande experiência e pratica nesta área;
- Interesse de após o termino da graduação, procurar especializar na área de eletrônica de potência.
- O mercado cada vez mais tem aplicado eletrônica de potência para o acionamento e controle de motores e maquinas, acredito assim que o mercado terá interesse por profissionais que atuem nesta área.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

É composto por introdução e conceitos teóricos, sobre todos os tópicos relacionados como o aquecedor indutivo, todo tipo de característica sobre o funcionamento será apresentado, contendo figuras, equações e tabelas, os resultados práticos não serão apresentados por dois motivos, dificuldade de encontrar componentes no mercado e tempo disponível para montagem.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TIRISTORES

O tiristor é um dos mais importantes tipos de dispositivos semicondutores de potência. Os tiristores são extensivamente utilizados em circuitos eletrônicos de potência. Eles são operados como chaves biestáveis, indo do estado de não-condução para o estado de condução. Os tiristores podem ser considerados como chaves ideais para muitas aplicações, mas os tiristores práticos exibem certas características e limitações.

2.1.1 Características dos Tiristores

O tiristor é um dos dispositivos semicondutor de quatro camadas, de estrutura *pnpn* com três junções *pn*. Possui três terminais: anodo, catodo e gatilho. A Figura 1, mostra o símbolo do tiristor e uma vista da secção transversal das três junções *pn*. Sendo seu processo de fabricação através de difusão.

Quando a tensão de anodo é positiva em relação ao catodo, as junções J_1 e J_3 estão polarizadas diretamente. A junção J_2 está reversamente polarizada e apenas uma pequena corrente de fuga flui do anodo para o catodo. Diz-se então que o tiristor esta na condição de bloqueio direto ou estado desligado e a corrente de fuga é conhecida como corrente de estado desligado I_D . Se a tensão anodo-catodo V_{AK} for aumentada a um valor suficiente grande, a junção reversamente polarizada J_2 romperá. Isto é conhecida como *ruptura por avalanche* e a tensão correspondente é chamada *tensão de ruptura direta*- V_{BO} . Como as junções J_1 e J_3 já estão diretamente polarizadas, haverá um movimento livre de portadores através de todas as três junções, resultando em um grande corrente de anodo no sentido direto. O dispositivo estará então no estado de condução ou estado ligado. A queda de tensão se deve à queda ôhmica nas quatro camadas e é pequena, tipicamente de 1 V. No estado de condução, a corrente de anodo é limitado por uma impedância ou resistência externa R_L , como mostrado na Figura 2.a. A corrente de anodo tem de estar acima de um valor conhecido como *corrente de travamento*, a fim de manter a quantidade necessária do fluxo de portadores na junção; de outra forma o dispositivo voltará à condição de bloqueio quando a tensão anodo-catodo for reduzida. A corrente de travamento I_L é a mínima corrente de anodo necessária para manter o tiristor no estado de condução, imediatamente após um tiristor ter sido ligado e o

sinal de gatilho ter sido removido. Uma curva característica típica v_i de um tiristor é mostrada na Figura 2.b.

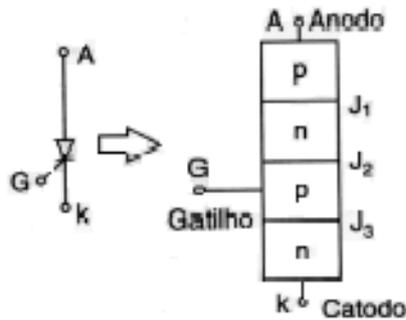


Figura 1 - Símbolo do tiristor e as três junções pn .
 Fonte: Adaptado de Rashid, Muhammad H (1999)

Uma vez que o tiristor conduz, ele se comporta como um diodo em condução e não há controle sobre o dispositivo. Ele continuará a conduzir porque não há camada de depleção devido ao movimento livre de portadores na junção J_2 . Entretanto, se a corrente direta de anodo for reduzida abaixo de um nível conhecido como *corrente de manutenção* - I_H , uma região de depleção se desenvolverá em torno da junção J_2 , devido ao reduzido número de portadores, e o tiristor estará no estado de bloqueio. A corrente de manutenção está na ordem de miliampères e é menor que a corrente de travamento. $I_L > I_H$. A corrente de travamento I_H é a mínima corrente de anodo para manter o tiristor no estado de condução. A corrente de manutenção é menor que a corrente de travamento.[1]

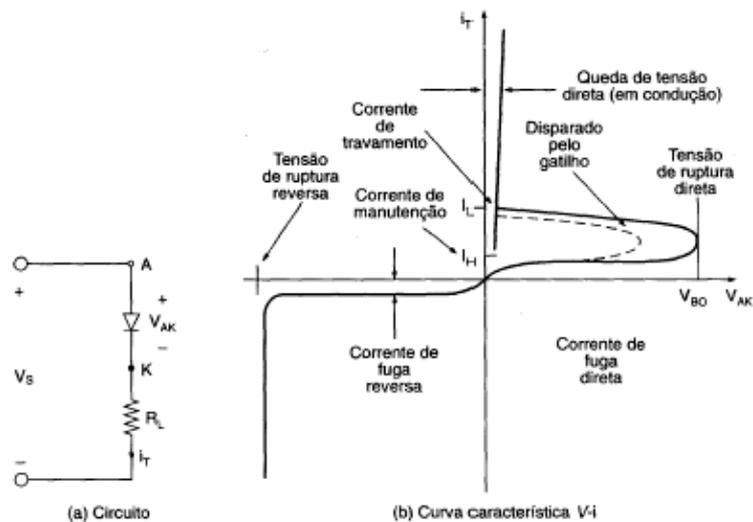


Figura 2 Circuito do tiristor e curva característica V-i.

Quando a tensão de catodo é positiva em relação ao anodo, a junção J_2 esta diretamente polarizada, mas as junções J_1 e J_3 estão reversamente polarizadas. Isto é, como dois diodos conectados em série, com tensão reversa sobre eles. O tiristor estará no estado de bloqueio reverso e uma corrente de fuga reversa, conhecida como corrente reversa I_R , flui através do dispositivo.

Um tiristor pode ser ligado pelo aumento da tensão direta V_{AK} além de V_{BO} , mas tal forma de ligá-lo pode ser destrutiva. Na prática, a tensão direta é mantida abaixo de V_{BO} e o tiristor é ligado (disparado) pela aplicação de uma tensão positiva entre seus terminais de gatilho e catodo. Isto é mostrado na Figura 2 b, pelas linhas pontilhadas. Uma vez que o tiristor seja disparado por um sinal de gatilho e sua corrente de anodo seja maior que a corrente de manutenção, o dispositivo continua a conduzir devido à realimentação positiva, mesmo que o sinal de gatilho seja removido. Um tiristor é um dispositivo de retenção ou travamento.

2.2 CONTROLADORES DE TENSÃO C.A.

Se uma chave com tiristor for conectada, entre a rede de alimentação CA e a carga, o fluxo de potência poderá ser controlado através da variação do valor eficaz da tensão CA aplicada à carga; e esse tipo de circuito de potência é conhecido como controlador de tensão CA. As aplicações mais comuns de *controladores de tensão CA* são: aquecimento industrial, mudança de derivação do transformador sob carga, controle de iluminação, controle de velocidade de maquinas de indução polifasicas e controles de eletroímãs CA, para este caso do TCC será utilizado para e variar a tensão da bobina. Para a transferência de potência, dois tipos de controle normalmente são utilizados:

- Controle liga-desliga ou tudo-ou-nada, (controle também interessante para tal aplicação);
- Controle do ângulo de fase.

No controle liga-desliga, as chaves com tiristores conectam a carga à rede de alimentação CA (fonte) por alguns ciclos da tensão de entrada e então a desconectam por outros poucos ciclos. No controle de fase, as chaves com tiristores conectam a carga à fonte CA durante uma porção de cada ciclo da tensão de entrada.

Os controladores de tensão CA podem ser classificados em dois tipos; (1) controladores monofásicos e (2) controladores trifásicos. Cada tipo pode ser subdividido em (a) controle unidirecional ou de meia-onda e (b) controle bidirecional ou de onda completa. Há várias configurações de controladores trifásicos, dependendo das conexões das chaves com tiristor.

Como a tensão de entrada é CA, os tiristores são comutados pela rede; e os tiristores de controle de fase, que são relativamente baratos e mais lentos que os de chaveamento rápido, são normalmente utilizados. Para aplicações de até 400 Hz, quando há Triacs disponíveis para alcançar as especificações de tensão e corrente para uma aplicação particular, eles são mais comumente utilizados. As técnicas de comutação de tiristores são discutidas no Cap. 4.

Devido à comutação natural ou pela rede, não há necessidade de circuitos de comutação adicionais, tornando os circuitos dos controladores de tensão CA muito simples. Devido à natureza das formas de onda de saída, a análise para a obtenção das derivações de expressões explícitas para parâmetros de performance dos circuitos não é simples, em especial para conversores de ângulo de fase controlado com carga RL . Entretanto, as cargas práticas são do tipo RL e devem ser consideradas no projeto e na análise de controladores de tensão CA.[1]

3. PRINCIPIO DE CONTROLE DE FASE

O princípio do controle de fase pode ser explicado a partir da Figura 3 a. O fluxo de potência para a carga é controlado atrasando-se o ângulo de disparo do tiristor T1. A Figura 3b, ilustra os pulsos de gatilho do tiristor T_1 e as formas de onda para as tensões de entrada e saída. Devido à presença do diodo D_1 , a faixa de controle é limitada e a tensão de rms efetiva somente pode ser variada entre 70,7 e 100%. A tensão de saída e a corrente de entrada são assimétricas e contêm componentes CC. Se houver um transformador de entrada, ela pode causar um problema de saturação. Esse circuito é um controlador monofásico de meia onda e é apropriado apenas para cargas resistivas de baixa potência, tais como aquecimento e iluminação, exemplificando seu funcionamento. Como o fluxo de potência é controlado durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, esse tipo é também conhecido como *controlador unidirecional*. [1]

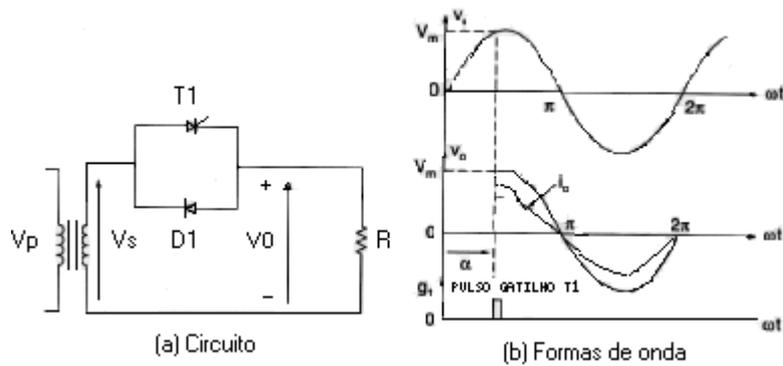


Figura 3 – Controle do Ângulo Monofásico

Se $v_s = V_m \sin \omega t = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$ for a tensão de entrada e o ângulo de disparo do tiristor T_1 for $\omega t = \alpha$, a tensão eficaz de saída será encontrada a partir de:

$$V_0 = V_s \left[\frac{1}{2\pi} \left(2\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \text{ A} \quad \text{Equação 1}$$

O valor médio da tensão de saída será:

$$V_{\text{médio}} = \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi} (\cos \alpha - 1) \quad \text{Equação 2}$$

Se α variar de 0 a π , V_0 oscilará de V_s a $V_s / \sqrt{2}$ e $V_{\text{médio}}$, de 0 a $-\sqrt{2}V_s / \pi$.

4. TÉCNICAS DE CONTROLE DE TIRISTORES

Um tiristor normalmente é disparado através da aplicação de um pulso de sinal no gatilho. Quando o tiristor está no modo de condução, sua queda de tensão é pequena, variando de 0,25 a 2V, e será desprezada neste caso. Uma vez que o tiristor é disparado e os requisitos de saída são satisfeitos, usualmente é necessário desligá-lo. Desligar ou cortar significa que a condução direta do tiristor tem de cessar e a reaplicação de uma tensão positiva ao anodo sem a aplicação de sinal no gatilho não causará fluxo de corrente. Comutação é o processo de desligamento ou corte de um tiristor, e ele normalmente causa a transferência do fluxo de corrente para outras partes do circuito.

Um circuito de comutação geral utiliza componentes adicionais para conseguir o desligamento.

Com o desenvolvimento dos tiristores, muitos circuitos de comutação também foram desenvolvidos e o objetivo de todos eles é reduzir o processo de desligamento dos tiristores.

Com a disponibilidade dos dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, tais como os transistores de potência, GTOs e IGBT's, os circuitos com tiristores são relativamente menos utilizados em conversores de potência. Entretanto, os tiristores têm um papel fundamental em aplicações de correntes elevadas, geralmente acima de 500 A e 1 KV. As técnicas de comutação utilizam a ressonância LC (ou circuitos RLC subamortecidos) para forçar a corrente e / ou a tensão de um tiristor a zero, cortando dessa forma o dispositivo.

A eletrônica de potência utiliza dispositivos semicondutores como chaves para “ligar” e “desligar” a energia para uma carga. Situações similares aos circuitos normalmente ocorrem em muitos circuitos de eletrônica de potência. O estudo das técnicas exibe as formas de onda de tensão e corrente transitórias dos circuitos *LC* sob varias condições. Ele auxilia na compreensão do fenômeno transitório *CC* sob condições de chaveamento.

Há varias técnicas para se comutar um tiristor; no entanto, elas podem ser classificadas, geralmente, em dois tipos:

- Comutação natural;
- Comutação forçada.

4.1. COMUTAÇÃO NATURAL

Quando a tensão da fonte (ou de entrada) é CA, a corrente do tiristor passa naturalmente por zero, e uma tensão reversa aparece sobre ele. O dispositivo é então automaticamente desligado devido ao comportamento natural da fonte de tensão. Isso é conhecido como *comutação natural*, *comutação pela linha* ou *pela rede*. Na prática, o tiristor é disparado de maneira síncrona com a passagem pelo zero da tensão positiva de entrada em todo o ciclo, a fim de fornecer um controle contínuo de potência. Esse tipo de comutação é aplicado aos controladores de tensão CA, retificadores de fase controlada e cicloconversores. A Fig. 4 b, mostra o arranjo do circuito para a comutação natural e a Fig 4 a, as formas de onda de tensão e corrente com um angulo de disparo α

= 0. O ângulo de disparo α é definido como o ângulo entre a passagem da tensão de entrada pelo zero e o instante em que o tiristor é disparado.

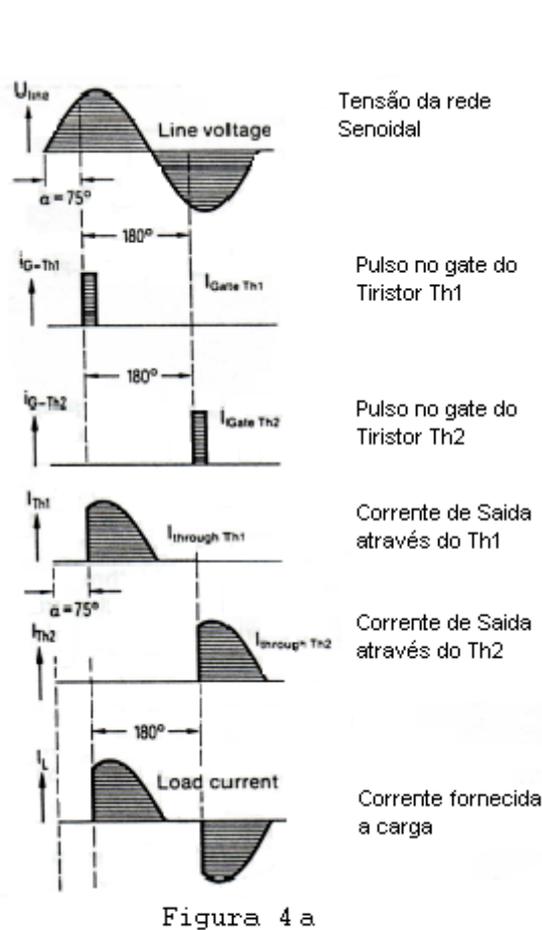


Figura 4 a

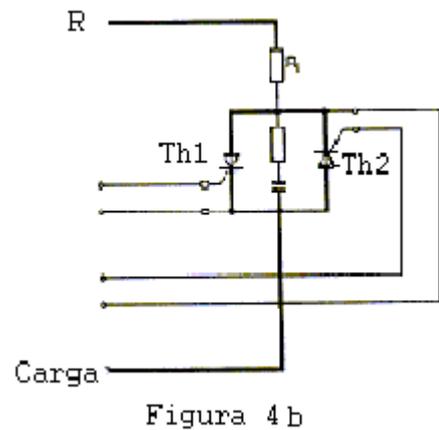


Figura 4 b

Figura 4 – Tempo de resposta da tensão e corrente após o disparo dos tiristores Th1 e Th2
 Fonte: Siemens - Integrated Phase Control TCA 780 [3].

4.2. COMUTAÇÃO FORÇADA

Em alguns circuitos tiristorizados, a tensão de entrada é CC. Portanto, deverá haver um circuito que fornece a corrente direta do tiristor é forçada a zero através de um circuito adicional, chamado *circuito de comutação*, para desligar o tiristor. Essa técnica é chamada *comutação forçada* é aplicada a conversores CC-CC (choppers) e conversores CC-CA (inversores). A comutação forçada de um tiristor pode ser conseguida através de sete maneiras, que podem ser classificadas como:

1. Autocomutação
2. Comutação por impulso
3. Comutação por pulso ressonante;
4. Comutação complementar
5. Comutação por pulso externo
6. Comutação do lado da carga
7. Comutação do lado da linha

Essa classificação de comutações forçadas é baseada no arranjo dos componentes do circuito de comutação e na maneira pela qual a corrente de um tiristor é forçada a zero. O circuito de comutação normalmente consiste de um capacitor mais indutor e um ou mais tiristores e diodos.

5. CONTROLADORES MONOFÁSICOS COM CARGAS INDUTIVAS

Na prática, a maioria das cargas, até um certo ponto, é indutiva. Um controlador de onda completa com uma carga RL é mostrado na Figura 5 a. Supor que o T_1 seja disparado durante o semiciclo positivo e conduza a corrente de carga. Devido à indutância no circuito, a corrente no tiristor T_1 não cai a zero em $\omega t = \pi$, quando a tensão de entrada começar a ficar negativa. O tiristor T_1 continuará a conduzir até que sua corrente i_1 cai a zero em $\omega t = \beta$. O ângulo de condução do tiristor T_1 é $\delta = \beta - \alpha$ e depende do ângulo de disparo α e do ângulo do fator de potência da carga θ . As formas de onda para corrente no tiristor, pulsos de gatilho e tensão são mostrados na figura 5b.[1]

Se $v_s = \sqrt{2}V_s \text{ sen } \omega t$ for a tensão instantânea de entrada e o ângulo de disparo do tiristor T_1 for α , a corrente no mesmo i_1 poderá ser encontrada a partir de:

Equação 3

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z} \text{sen}(\omega t - \theta) + A1e^{-(R/L)t}$$

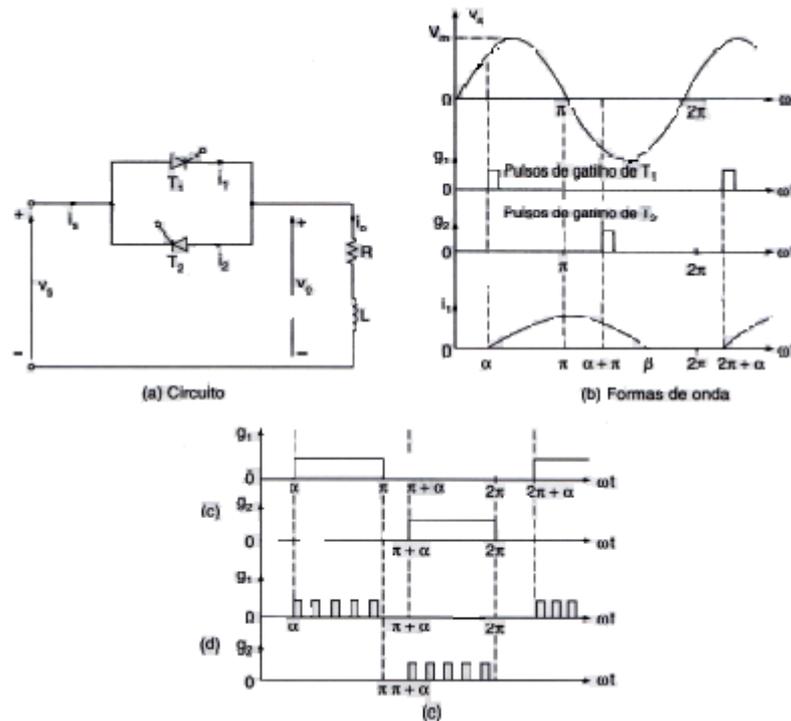


Figura 5 – Controlador monofásico de onda completa com carga RL

O ângulo β , que também é conhecido como ângulo de extinção, pode ser determinado a partir dessa equação transcendental, sendo que esta requer um método iterativo de solução. Um vez que seja conhecido β , o ângulo de condução do tiristor T_1 pode ser encontrado a partir de:

$$\delta = \beta - \alpha$$

Equação 4

A tensão eficaz de saída é :

$$V_o = \left[\frac{1}{\pi} \left(\beta - \alpha + \frac{\text{sen } 2\alpha}{2} - \frac{\text{sen } 2\beta}{2} \right) \right]^{1/2}$$

Equação 5

A corrente eficaz de saída pode então ser determinada através da combinação da corrente eficaz de cada tiristor como:

$$I_0 = \left(I_{R1}^2 + I_{R2}^2 \right)^{1/2} = \sqrt{2} \cdot I_R \quad \text{Equação 6}$$

Os sinais de gatilho dos tiristores para um controlador com cargas resistiva podem ser pulsos curtos. Entretanto, esses pulsos de curta duração não são apropriados para cargas indutivas. Isso pode ser explicado com base na Figura 5 b. Quando o tiristor T_2 é disparado em $\omega t = \pi + \alpha$, o tiristor T_1 ainda está conduzindo devido a baixa indutância da carga. Quando a corrente no tiristor T_1 cai a zero e este é desligado em $\omega t = \beta = \alpha + \delta$, o pulso de gatilho do tiristor T_2 já cessou (cai a zero) e, conseqüentemente, T_2 não será disparado. Como resultado, apenas o T_1 operará causando formas de onda assimétrica da tensão e corrente de saída. Essa dificuldade pode ser resolvida utilizando-se sinais de gatilho contínuos com uma duração de $(\pi - \alpha)$, como mostrado na Figura 5 c. tão logo a corrente de T_1 caísse a zero, o tiristor T_2 (com os pulsos gatilho como mostrados na Figura 5c, seria disparado. Entretanto, um pulso de gatilho contínuo aumenta as perdas de chaveamento dos tiristores e requer um transformador de isolamento maior para o circuito de disparo. Na pratica, um trem de pulso com curtas durações, normalmente é utilizado para superar esses problemas.

5.1. PROTEÇÃO DOS TIRISTORES CONTRA di/dt e dV/dt

Proteção contra di/dt – Um tiristor necessita de um tempo mínimo para espalhar a condução de corrente uniformemente por todas as junções. Se a taxa de crescimento da corrente de anodo for muito rápida, comparada à velocidade de espalhamento do processo de disparo, um “ponto quente” localizado ocorrerá, devido à elevada densidade de corrente e o dispositivo poderá falhar, como resultado da temperatura excessiva.

Os dispositivos práticos devem ser protegidos contra di/dt elevados. Na prática, di/dt é limitada pela adição de um indutor em série L_s . A formula para encontrar o valor de di/dt é através da Eq. 7.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s}{L_s} \quad \text{Equação 7}$$

Onde L_s é a indutância em série, incluindo qualquer indutância parasita.

Proteção Contra dv/dt – Se a chave CH1, da Figura 6, for fechada em $t = 0$, um degrau de tensão será aplicado sobre os tiristores e o dv/dt pode ser elevado o suficiente para disparar o dispositivo sem permissão. O dv/dt pode ser limitado através da conexão de um capacitor C em serie com o resistor R. Quando o tiristor T1 e T2 for disparado, a corrente de descarga do capacitor será limitada pelo resistor R.

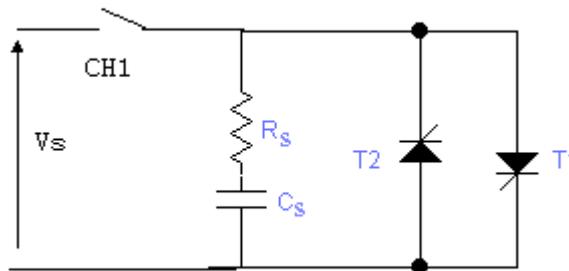


Figura 6 – Circuitos de proteção contra dv/dt

$$\frac{dv}{dt} = 0,632 \frac{V_s}{\tau} = 0,632 \frac{V_s}{R_s C_s} \quad \text{Equação 8}$$

Com um circuito RC, conhecido como circuito *snubber*, a tensão sobre o tiristor crescerá exponencialmente. O valor da constante de tempo snubber $\tau = R_s C_s$, pode ser determinado a partir da Eq. 8, para um valor conhecido de dv/dt . O valor de R_s é encontrado a partir da corrente de descarga I_{TD} .

$$R_s = \frac{V_s}{I_{TD}} \quad \text{Equação 9}$$

$$I_{TD} = \frac{V_s}{R_1 + R_2}$$

Equação
10

Uma vez que a razão de amortecimento seja conhecida, R_s e C_s podem ser encontrados. A mesma rede RC ou snubber é normalmente utilizado tanto para proteção contra dv/dt quanto para supressão de tensões transitórias devido ao tempo de recuperação reversa.

6. CIRCUITOS MAGNÉTICOS

O comportamento completo do campo magnético é descrito pelas equações de Maxwell, complementares por relações constituintes que introduzem parâmetros dos vários materiais ocupados pelo campo. No caso de transformadores, as frequências e as dimensões são tais que os termos corrente de deslocamento das equações de Maxwell podem ser desprezados, o que permite utilizar a forma “quase-estática” das equações. Com esta afirmação é possível concluir que o campo magnético sob condições variáveis no tempo são os mesmos que sob condições estáticas, nos mesmos níveis elétricos. De um ponto de vista prático, isto significa podermos resolver todos os problemas de circuitos magnéticos sob condições estáticas, e depois introduzir a variação no tempo. De outro modo, a solução de problemas de circuitos magnéticos para as configurações das máquinas reais seria uma tarefa extremamente difícil.

A lei básica que determina a relação entre corrente elétrica e campo magnético é a lei de Ampère;

$$\int_S \vec{J} \cdot d\vec{a} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{L}$$

Equação 11

onde J é a densidade de corrente e H intensidade de campo magnético em unidades mks, J é dado em ampère por metro quadrado e H em ampère-espira. A Eq.11, afirma que a integral de linha de

H ao longo do contorno de uma superfície aberta, através da qual passa a densidade de corrente J , é igual à corrente total envolvida pelo percurso fechado, definido pelo caminho d_L .

O segundo membro é igual ao produto $H_n l_n$ da intensidade de campo magnético e do comprimento médio do núcleo. Será apresentado adiante por que podemos supor que H_n é constante ao longo do percurso medido por l_n , a relação pode ser vista através da Eq. 12. [2]

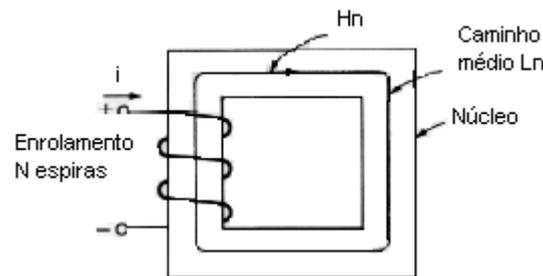


Figura 7 – Circuito magnético simples

$$Ni = H_n l_n \quad \text{Equação 12}$$

Os ampère-espiras Ni podem ser produzidos por um ou mais enrolamentos, onde o total de todos os enrolamentos é Ni . A direção de H_n com respeito a Ni é dada matematicamente na Eq. 11, mas pela regra da mão direita.

A intensidade de campo magnético H produz uma indução magnética B em toda a região onde ela existe, no valor da Eq. 13.

$$B = \mu H \quad \text{Equação 13}$$

A unidade de B é weber por metro quadrado, onde 1 weber = 10^8 linhas de campo magnético. O termo μ é a permeabilidade e é uma propriedade do material a ser usado. Em unidades mks a permeabilidade no vácuo é $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ weber/A.m. A permeabilidade dos materiais ferromagnético é expressa usualmente pela permeabilidade μ_r , relativa ao valor do para o vácuo, ou $\mu = \mu_r \mu_0$. Valores típicos de μ_r , estão na faixa de 2000 a 6000, para materiais usados

em máquinas. A Eq.11, precisa ser satisfeita para todo caminho no espaço, concatenando com o enrolamento na Fig. 7. Os valores de H ao longo dos caminhos são independentes de eles atravessarem o material ou não. Entretanto a indução magnética B produzida por H é desprezível em todos os pontos, exceto no núcleo de ferro. Quando os circuitos magnéticos são analisados para determinar o fluxo e a indução magnética nos principais caminhos magnéticos através do núcleo, o campo magnético fora do núcleo e seus entreferros é usualmente desprezado. Entretanto, quando dois ou mais enrolamentos estão colocados sobre um circuito magnético, como em um transformador ou uma máquina rotativa, os campos fora do núcleo, chamado campos de dispersão, são extremamente importantes na determinação do acoplamento entre os enrolamentos.[2]

7. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

As máquinas e os transformadores utilizam materiais magnéticos de vários tamanhos e formas, desde folhas finas estampadas de aço-silício até peças sólidas de ferro para rotores de alternadores síncronos. Todo material ferromagnético utilizado para máquinas é caracterizado por uma alta permeabilidade relativa e também por uma relação não-linear e multivalente entre B e H . As características do material não podem ser descritas por poucas constantes numéricas, mas precisam ser descritas por um conjunto de curvas relacionando as variáveis de interesse com outras variáveis como espessura e frequência, como parâmetros.

As informações básicas das propriedades magnéticas é dada pelo ciclo $B-H$, ou de histerese. Esta curva mostra a relação instantânea entre a indução magnética B e a intensidade de campo magnético H num ciclo completo de funcionamento. Para cada valor de indução magnética máxima, nas extremidades do ciclo, o material tem um ciclo $B-H$ diferente. Um ciclo de histerese típico para um aço utilizado em equipamento, M-19, processado completamente, é mostrado na Fig. 8 , para induções magnéticas máximas de 1,0e 1,5 Wb/m^2 .[2]

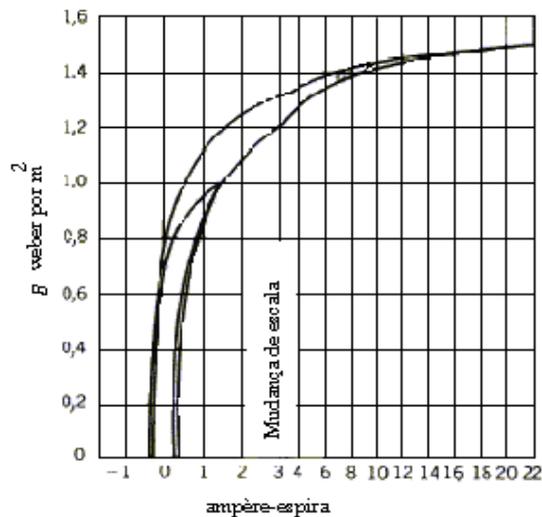


Figura 8 – Ciclo de histerese para aço M-19, completamente processado

O ciclo mostra que a relação entre B e H é não linear e multivalente. Ciclo $B-H$ demonstra o mecanismo da relação, mas é de pouca utilidade em engenharia. A informação útil dada pelo ciclo é a relação entre os valores máximos de B e H na extremidade do ciclo. Esta informação é apresentada como uma curva normal de magnetização, que passa pelas extremidades de uma sucessão de ciclos $B-H$ cobrindo a faixa de indução magnética.

7.1. PERDAS NOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

Nos materiais magnéticos ocorre uma perda de energia cada vez que o material é submetido a um ciclo do seu ciclo de histerese. A perda é separada em perda por correntes de Foucault e perda por histerese; a primeira componente é provocada pela perda I^2R de correntes que circulam no material, tendendo a se opor a variação da indução magnética; a segunda componente corresponde à energia despendida em orientar os domínios magnéticos do material na direção do campo. As perdas dependem da metalurgia do material, particularmente da percentagem de silício, da frequência, da espessura do material em um plano normal ao campo e da indução magnética máxima. Em equipamento elétrico a perda no núcleo deve ser dissipada como calor, e também contribui para as perdas totais do próprio equipamento. Os dados sobre as perdas no núcleo podem ser apresentados na Fig. 9, em watt por unidade de massa, em função da indução magnética, a uma frequência determinada. Esta informação é complementada por curvas de perdas no núcleo em função da frequência, com a indução magnética como parâmetro.

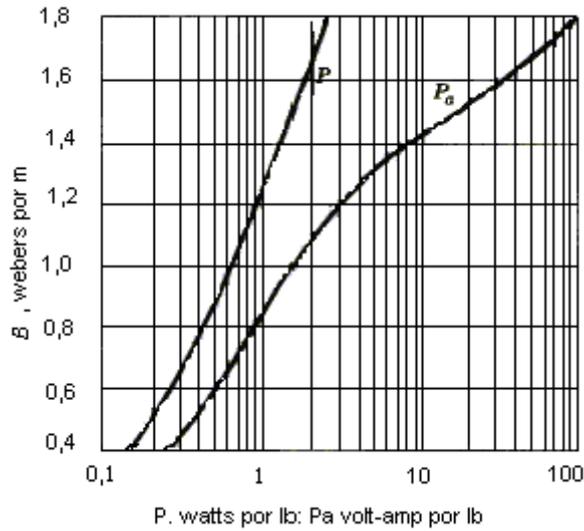


Figura 9 – Curvas de perda no núcleo e potência de excitação para aço M-19

As características de materiais magnéticos sob excitação de CA são usualmente apresentadas em termos de potência aparente por unidade de massa de matéria Pa , como função da indução magnética em lugar da curva de magnetização relacionando B e H . Particularmente em transformadores e reatores com entreferro, e em menor frequência em máquinas rotativas, o material magnético funciona à mesma indução magnética na estrutura inteira; a potência aparente de excitação para o material é então encontrada como o produto de Pa pela massa.

Outro tipo de perdas que é conhecida como perdas por histerese, é se o circuito magnético contiver material ferromagnético, a relação é mais ou menos não-linear, como na curva ascendente a da Fig.10. devido à histerese e corrente de Foucault, a relação entre H_n e B_n , não é biunívoca

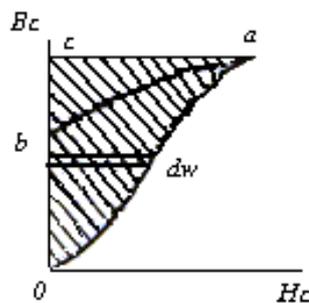


Figura 10 – Característica $B_n = H_n$ e energia no campo magnético

A curva descendente é indicada pela linha de a à b na Fig. 10. Quando H_n é reduzida a zero, somente uma parte da energia que foi absorvida pelo campo durante o processo ascendente é

devolvida, sendo seu valor dado pela área abc . Alguma energia permanece armazenada como energia cinética associada aos elétrons e produz fluxo residual, e alguma energia foi dissipada como perda no núcleo, causada pela histerese e pelas correntes de Foucault. A energia líquida absorvida durante o processo ascendente e descendente Oab é a área $OabO$ na Fig.10. Se a taxa de variação no tempo for suficientemente lenta, de modo que os efeitos das correntes de Foucault possam ser desprezados, as características de fluxo-fmm Oa e ab tornam-se as curvas de magnetização ascendentes e descendentes. Em condições cíclicas, a perda por histerese pode ser determinada a partir da área de um ciclo de histerese como mostra na Fig. 11.

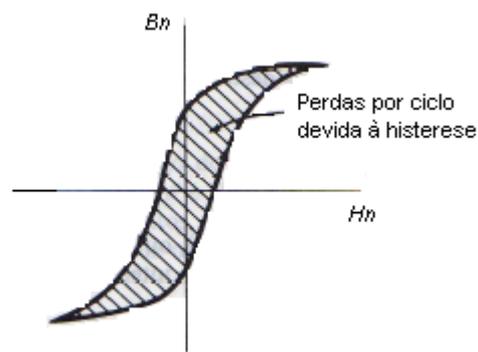


Figura 11 – Ciclo de histerese simétrico
 Fonte: Adaptado Fitzgerald A.E. (1975)

8. FUNCIONAMENTO EM C.A.

Se o campo magnético varia com o tempo, produz um campo elétrico E no espaço, de acordo com a lei de Faraday.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_s B \cdot d\vec{a} \quad \text{Equação 14}$$

onde a integral de linha é calculada ao longo do contorno da superfície aberta atravessada por $B \cdot d\vec{a}$ unidade de E é volt por metro (V/m). Em estruturas magnéticas com enrolamentos, como na Fig.7, o campo magnético variável no núcleo produz uma fem nos terminais de valor:

$$e = N \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{Equação 15}$$

onde $\lambda = N\varphi$, chamado fluxo concatenado, em unidade Weber-espira (Wb-e). O símbolo φ é utilizado para indicar o valor instantâneo do fluxo magnético que varia no tempo.

Para um circuito magnético no qual existe uma relação linear entre B e H , devido à permeabilidade constante do material ou à predominância do entreferro, podemos definir a relação entre λ e i por meio da indutância L ;

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad \text{Equação 16}$$

A indutância pode ser expressa também em grandezas de campo:[2]

$$L = \frac{N^2 BA}{Hl} = N^2 \mu \frac{A}{l} = N^2 F \quad \text{Equação 17}$$

A indutância é medida em Henry (H) ou weber-espira por ampère (Wb/A). Para circuitos magnéticos estáticos, a indutância é fixa e a equação para este caso é bem conhecida para circuitos da Eq. 15 e 16:

$$e = \frac{d}{dt}(Li) \quad \text{Equação 18}$$

A potência nos terminais de um enrolamento de um circuito magnético é uma medida da taxa de fluxo de energia, que entra no circuito através deste particular enrolamento. A potência nos terminais na Fig. 7, cuja unidade é watt (W), ou Joule por segundo.[2]

$$p = ie = i \frac{d\lambda}{dt}$$

Equação 19

8.1. INTRODUÇÃO AO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

No aquecimento por indução eletromagnética, existe uma transferência de energia das espiras para a peça através do campo magnético alternado. A força magnética induzida provoca a circulação de corrente, a qual provoca aquecimento. Essa corrente fica concentrada na superfície da peça, e a sua densidade cai exponencialmente com a distância a partir da superfície, de acordo com a Eq. 20.

$$I = I_0^{(-x/\Delta)}$$

Equação 20

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \delta}}$$

Equação 21

Δ – é conhecido como efeito pelicular, dado pela Eq. 21

$\pi = 3,1415\dots$,

f = frequência (Hz) do sinal de corrente,

μ = permeabilidade magnética (Henry/m) do material da peça.

δ = condutividade do material da peça (Siemens/m).

Formula para calculo da secção do condutor:

S = Secção do condutor em mm^2 ,

σ = condutividade do material condutor,

R = Resistência elétrica.

$$S = \frac{l}{\sigma.R}$$

Equação 22

9. PROJETO

Nesta etapa da monografia será apresentado o projeto, como elaborar as partes que o envolve os circuitos de controle, e seu funcionamento e vantagens.

9.1. CONTROLADOR DE TEMPERATURA

Para que possa ter um controle real da temperatura de aquecimento é necessário o uso de um controlador de temperatura para enviar sinal à placa de controle de disparos dos SCR's, Item 9.2 informando que pode ou não energizar os terminais da bobina, também o operador poderá ajustar o valor máximo de aquecimento do rolamento através de um potenciômetro com faixa de variação de temperatura de 0° a 100° Celsius, este controlador utiliza um sensor tipo J que será fixo ao rolamento no momento de aquecimento, sua função é enviar um valor de tensão na ordem de milivolt para o controlador como fonte de informação, o controlador compara este sinal que é proporcional a temperatura com o valor ajustado pelo potenciômetro, quando não há diferença dos sinais o controlador abre um contato de um relê, este contato aberto irá enviar um sinal à placa de controle para desligar o sinal do gate dos SCR's.

A Fig. 12, indica a fotografia do controlador de temperatura utilizado. É um controlador analógico modelo LM, fabricante COEL com as seguintes características. [4]

- Escala para sensor tipo J, protegido contra ruptura do sensor;
- Controle ON-OFF, proporcional;
- Saída para controle com 1 relê;
- Desvio de temperatura ajustável de -30° a +30°;
- Alimentação bi-volt 110/220 V.



Figura 12 Controlador de Temperatura

O fato de se utilizar um controlador de temperatura comercial, não quer dizer que não seja possível projetá-lo e de construí-lo, o objetivo não está em torno dele, mas é uma ferramenta importante para o controle da temperatura do rolamento, dimensionado com cuidado para atender todas as características de funcionamento do aquecedor.

9.2. CONTROLE DE TENSÃO

Para o controle de fase será utilizado um circuito integrado chamado de TCA 780. É um circuito integrado analógico de controle de fase, usado para controle de tiristores e triacs, com relação à seleção de tensão saída pode ser realizado de duas maneiras, (1) com chaves que são inseridas nos terminais de entrada do TCA 780 pode ter vários valores discretos, em um número pequeno de componentes é necessário para isto, ou (2) variando a tensão de entrada pode se ter um valor variável e contínuo de tensão de saída, variando o valor da saída de 0V à tensão nominal, levando em consideração a queda de tensão dos tiristores.[3]

Aplicações do TCA 780

- Tensão zero em tensão AC, usado como chaves em corrente AC, pode ser utilizado como chaves, tiristores ou triacs.

A Fig. 13 apresenta o circuito interno do TCA 780 e indica a função de cada pino de seu encapsulamento.

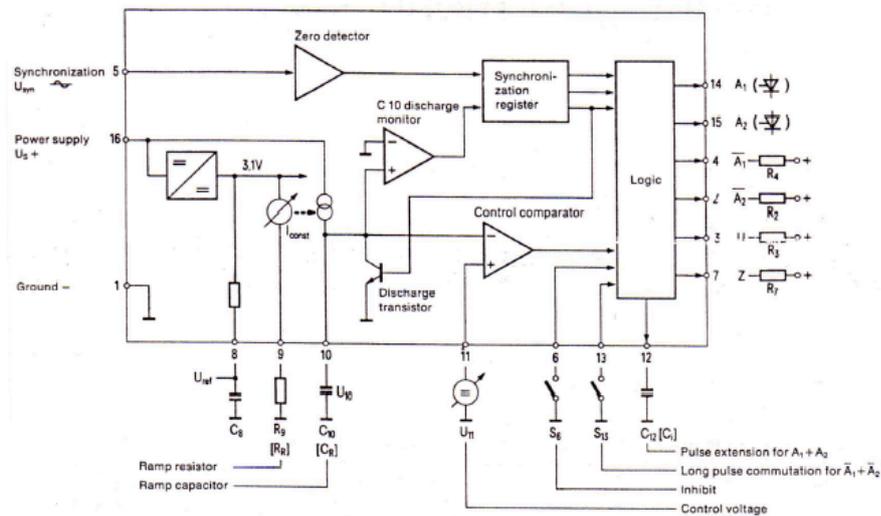


Figura 13. Circuito interno do TCA 780

Na Fig. 14, apresenta a operação de disparo que usa um CI TCA 780, os componentes de alimentação, envio e entrada de sinais de controles, e dois tiristores conectados antiparalelos. o pulso de saída gerado pelo CI pode ser continuamente variado dentro de um ângulo de fase de 0° para 180° por meio de um potenciômetro. durante o semiciclo negativo o pulso de disparo sai do pino 14 que alimenta um transformador de pulso, este transformador tem a função de isolar o circuito de potência com o de controle. Durante ciclo positivo o segundo tiristor é ativado diretamente pelo saída do CI pino 15. [3]

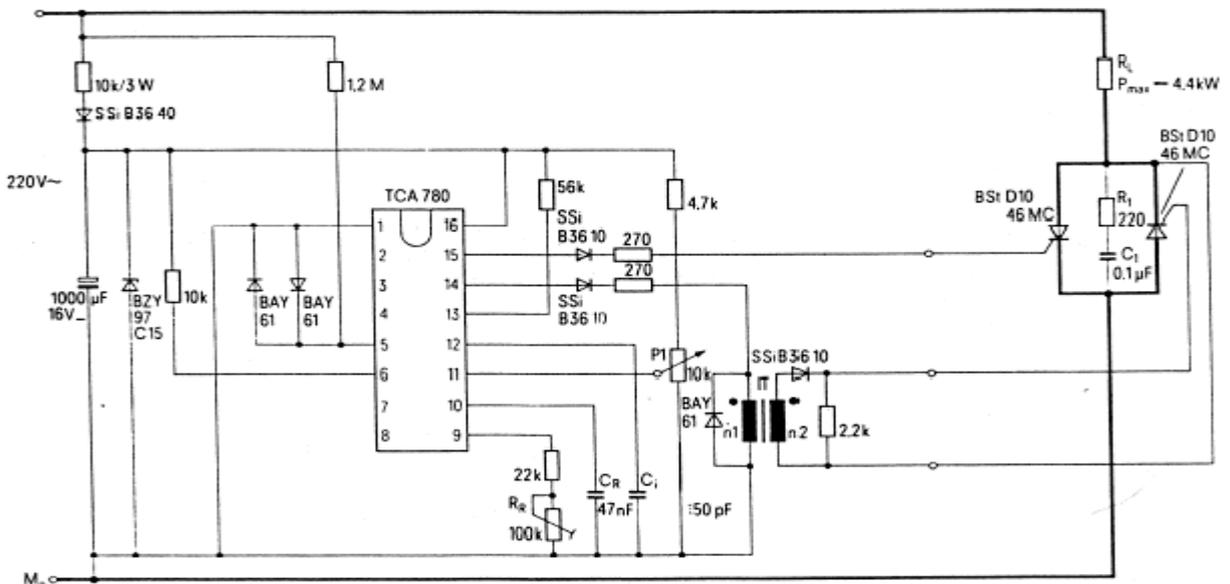


Figura 14. Circuito de controle dos disparos do tiristores
Fonte: Siemens - Integrated Phase Control TCA 780

Função do circuito, esta análise começa a partir do ponto de alimentação:

- Alimentação do circuito 220 VCA, 60 Hz;
- Resistor de 10K / 3W, usado para realizar queda de tensão na entrada do circuito;
- Diodo SSiB3640 – usado neste caso como retificador de meia onda;
- Capacitor 1000 μ F / 16 Vcc – funciona como filtro do retificador;
- TCA 780 – É um CI analógico de controle de disparo para controle de ângulo de fase, utiliza componentes de potência como - tiristores ou triacs;
- Potenciômetro - P1 10K Ω – será responsável para enviar sinal ao CI TCA 780 para variar o ângulo de disparo;
- Diodos B3610 usados para bloquear tensão reversa;
- Capacitores para filtro do circuito;
- Trimpot R_r 100K usado para ajustar a referencia de rampa do sinal de saída do CI TCA 780;
- IT , transformador de pulso, tem a finalidade de isolar o circuito de potencia com o circuito de controle
- Tiristor BStD1046MC, são os tiristores responsáveis para controlar a tensão nos terminais da bobina;
- RL – Representa a carga.

9.3. PROJETO DA BOBINA

Esta etapa esta relacionada com o projeto da bobina, as informações necessárias para o calculo é apresentada no Cap. 4. Para cada potência diferente é necessário realizar novos cálculos. Para se iniciar o calculo da bobina é necessário levar em consideração alguns fatores como:

- Tipo de Material (neste caso M-19)
- Espessura, formato e comprimento.

- E principalmente a área do núcleo da bobina, através deste dado que se pode calcular a potência do circuito.

9.4. FUNCIONAMENTO DO AQUECEDOR COM TODAS AS PARTES INTERLIGADAS

A função do circuito magnético é converter a energia elétrica em linhas de campo magnético. Este campo magnético irá induzir tensão no anel do rolamento. Como o anel possui um circuito fechado a tensão é praticamente zero, apresentando apenas corrente circulando no anel, o funcionamento pode se comparar como o secundário de um transformador em curto irá ter um grande valor de corrente circulando com tensão zero, esta corrente faz com que haja grande movimentação dos elétrons, ocasionando a dilatação do rolamento. Neste tipo de aquecedor é importante o controle de potência da bobina, pelo fato do rolamento com diâmetro interno pequeno, não haver a necessidade de ser utilizada uma potência elevada, isso pode acarretar em saturação do núcleo, e desperdício de energia elétrica. A forma de o operador trabalhar com o aquecedor será em função de tabela, esta tabela será dividida em quatro grupos e em cada grupo terá um número respectivo de rolamentos que serão usados, o porque de ser dividido em quatro grupos refere-se a ter quatro bastões de áreas diferentes, a Tab. 1 indica o bastão utilizado, o número de identificação do rolamento, a medida em milímetro do diâmetro interno dos rolamentos e o valor ajuste do potenciômetro para o controle de tensão, assim torna-se mais fácil o operador trabalhar e ter um melhor aproveitamento do equipamento. Este bastão é a parte superior que vai sobre o aquecedor, é a área mais escura da Fig. 15, na verdade ele é utilizado para fechar o circuito magnético da bobina primária.

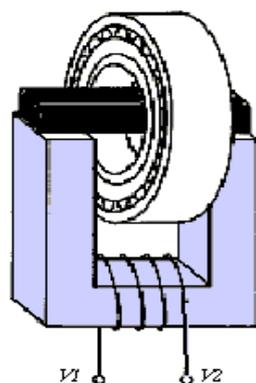


Figura 15 – Esquema Funcional do Aquecedor

O potenciômetro P1 da Fig. 14, possui um giro de 0 à 300° radianos, com valor máximo de resistência de 100 K Ω , para que o operador possa saber qual o valor de resistência do potenciômetro para cada bastão é colocado uma escala em torno da haste de giro do potenciômetro com relação de 1: 10K Ω ou seja o valor da escala do potenciômetro varia de 0 à 10 com intervalo de 1 em 1, assim o operador pode encontrar o valor correto de ajuste para cada bastão através da Tab. 1.

Tamanho do Bastão	Ajuste do Potenciômetro em Escala	Valor da Tensão Rms nos Terminais V1 e V2	Numero do Rolamento (Código)	Diâmetro Interno do Rolamento mm
Bastão 1	4	88 V	6200	10
			6201	12
			6202	15
			6203	17
Bastão 2	6	132 V	6204	20
			6205	25
			6206	30
			6207	35
Bastão 3	8	176 V	6208	40
			6209	45
			6210	50
			6211	55
Bastão 4	10	220 V	6212	60
			6213	65
			6214	70
			6215	75

Tabela 1 – Controle prático para n medidas de Rolamentos

Após o operador selecionar o tipo de bastão, ter ajustado o potenciômetro P1 para o rolamento desejado, sensor é fixado ao rolamento e a temperatura máxima de aquecimento ajustada, o operador poderá ligar a chave Ch responsável para iniciar o processo de condução dos tiristores, controlado pelo TCA 780, após o aquecimento o controlador de temperatura enviará um sinal para desligar a chave Ch, fazendo com o TCA 780 pare de enviar os sinais no gate dos tiristores.

9.5. VANTAGENS

O aquecedor indutivo substitui outras formas de aquecimento utilizadas:

- Estufa / Forno: O controle da temperatura é dentro da estufa a ser aquecida, além de que o usuário recebe choque térmico ao retirar a peça da estufa.
- Placas de aquecimento: A peça a ser aquecida recebe aquecimento apenas um lado, não sendo homogêneo, sendo de que de um lado a temperatura irá ser superior ao outro.
- Banho de óleo quente: O óleo quente é contaminado através dos aquecimentos contínuos, provocando resíduos que são alojados nas peças a serem aquecidas, provoca fumaça e odor, além de risco de provocar acidentes.
- Martelo. A montagem da peça por impacto provoca danos diretos na peça.

Portanto é um equipamento de grande utilidade nas empresas e facilita e melhora o processo de manutenção.

O aquecedor indutivo montado está representado na Fig. 16, contendo controlador de temperatura, potenciômetro para ajuste do ângulo de fase de disparo dos SCR's, botão liga / desliga do aquecedor e sensor de temperatura tipo J.

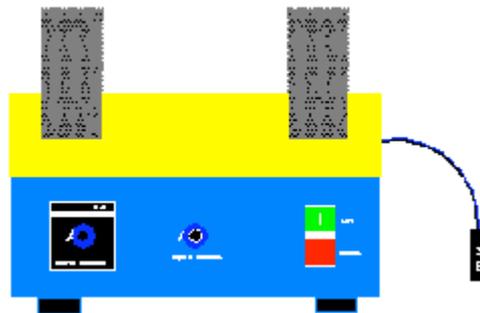


Figura 16 – Aquecedor de Rolamento Indutivo

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram alterados os valores dos tiristores do circuito de potência descrito na Fig. 16, estes tiristores foram dimensionados para uma carga de 4.4 KW, a potência do aquecedor de rolamentos é aproximadamente de 6.6 KW, com isso é necessário alterar também os componentes do circuito *snubber*, a tensão e corrente necessário para o sinal de disparo (gate) do TCA 780, não houve problema, para tal conclusão foi verificado valores de Datasheet dos componentes, tais dados encontram-se no anexo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rashid, Muhammad H. Eletrônica de Potência: circuitos dispositivos e aplicações / Muhammad H. Rashid; tradução de Carlos Alberto Favato. -- São Paulo: Makron, 1999
- [2] Fitzgerald, A. E. Maquinas Elétricas / A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr. , Alexander Kusko. - - São Paulo : McGraw-Hill, 1975-1978.
- [3] Siemens, Integrated Phase Control TCA 780 for Power Electronics
- [4]http://www.jaguareletrica.com.br/coel_tempera_control.htm – visitado em 20/10/2004
- [5]<http://www.semikron.com/internet/ds.jsp?file=325.html> – visitado em 20/10/2004
- [6]<http://www.siemens.com/tca780.htm> – vistidado em 21/10/2004

ANEXOS – DATASHEET DE COMPONENTES

No anexo A, são apresentadas as informações do circuito integrado TCA 780, informações fornecidas pelo fabricante como valores de tensão, corrente, frequência, função dos pinos do componente. Formas de onda dos sinais de entrada e saída, blocos do circuito externo e parâmetros de seu funcionamento.

No anexo B, são fornecidas informações sobre os tiristores que podem ser usados no aquecedor, neles são apresentadas todas as informações sobre o componente, gráficos sobre o funcionamento para diferentes situações de trabalho e ambiente.

