

NERY DE OLIVEIRA JUNIOR

ACIONAMENTOS DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Conhecimentos Básicos Fundamentais
Instruções Gerais para Acionamentos Elétricos
Regulados em Velocidade Variável e em Corrente Alternada

Artliber
EDITORA

NERY DE OLIVEIRA JUNIOR

ACIONAMENTOS DE VELOCIDADE VARIÁVEL

CONHECIMENTOS BÁSICOS FUNDAMENTAIS
INSTRUÇÕES GERAIS PARA ACIONAMENTOS ELÉTRICOS REGULADOS
EM VELOCIDADE VARIÁVEL E EM CORRENTE ALTERNADA

Artliber
EDITORA

Copyright© 2019 by Artliber Editora Ltda.

Revisão:
Denise Marson
Capa e editoração:
Editorando Birô

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro)

O971a Oliveira Junior, Nery de
1.ed. Acionamento de velocidade variável: conhecimentos básicos
fundamentais instruções gerais para acionamentos elétricos
regulados em velocidade variável e em corrente alternada / Nery de
Oliveira Junior. – 1.ed. – São Paulo: Artliber, 2019.
324 p.; 17 x 24 cm.

ISBN: 978-85-88098-55-8

1. Engenharia. 2. Velocidade variável. 3. Acionamentos
elétricos. 4. Velocidade variável. 5. Corrente alternada. I. Título.

CDD 620

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia: velocidade variável
2. Acionamentos elétricos: velocidade variável
3. Corrente alternada

2019

Todos os direitos desta edição são reservados à

Artliber Editora Ltda.

Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3294

05083-010 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: (11) 3832-5489 – 3641-3893

info@artliber.com.br

www.artliber.com.br

SUMÁRIO

Prefácio.....	5
Introdução.....	11
1. Cargas	15
1.1 – Cargas normais mais comuns.....	18
1.1.1 – Carga de torque constante	20
1.1.2 – Carga de torque quadrático.....	26
1.1.3 - Carga de torque linear	31
1.1.4 – Carga de torque inverso.....	33
1.2 – Torque acelerante	37
2. Motores	39
2.1 – Motor assíncrono de gaiola.....	40
2.1.1 – Curva característica de torque x velocidade – $m \times \eta$	40
2.1.2 – Curva característica de corrente x velocidade – $i \times \eta$	43
2.1.3 – Curvas características $m \times \eta$ e $i \times \eta$ com a variação de velocidade	48
2.1.3.1 – Desenvolvimento teórico	49
2.1.3.2.1 – Operação em frequência abaixo da nominal	50
2.1.3.1.2 – Operação em frequência acima da nominal	51
2.1.3.2 – Desenvolvimento prático	53
2.1.3.2.1 – Operação em frequência abaixo da nominal	53
2.1.3.2.2 – Operação em frequência acima da nominal	55
2.1.4 – Cálculo da corrente do motor em velocidade variável.....	57
2.1.5 – Potência do motor em velocidade variável	61
2.1.6 – Motor versus carga	63
2.2 – Servomotores	69
2.2.1 – Definição e exigências da aplicação	70
2.2.2 – Máquinas elétricas – servomotores	72
2.2.2.1 – Servomotores assíncronos	72
2.2.2.2 – Servomotores síncronos – ímã permanente	73
2.3 – Regime intermitente de operação.....	77
3. Conversores de frequência.....	95
3.1 – Frequência constante.....	97
3.1.1 – Controle pela tensão do estator	97
3.1.2 – Controle pela tensão do rotor: resistência rotórica	98
3.1.3 – Controle pela tensão do rotor: cascata subsíncrona	100

3.2 – Frequência variável.....	101
3.2.1 – Controle direto – conversor direto – ciclo conversor.....	102
3.2.2 – Controle indireto, com circuito intermediário de tensão variável.....	103
3.2.2.1 – Conversores com circuito intermediário de corrente.....	103
3.2.2.2 – Conversores com circuito intermediário de tensão variável.....	106
3.2.2.3 – Conversores autocomutados – conversores com circuito.....	108
3.2.3 – Controle indireto, com circuito intermediário de tensão constante....	110
3.2.3.1 – Controle indireto, com circuito intermediário de tensão constante – parte inversora.....	112
3.2.3.2 – Controle indireto, com circuito intermediário de tensão constante – parte inversora efeitos da modulação pwm.....	118
3.2.3.3 – Controle indireto, com circuito intermediário de tensão constante (parte inversora), em servomotores de ímã permanente.....	128
4. Circuito intermediário de Inversores pwm.....	131
4.1 – Configurações do circuito intermediário.....	132
4.2 – Operação quatro quadrantes – frenagem.....	136
4.3 – Regulador de tensão do circuito intermediário.....	143
4.3.1 – Suprimento de energia pelo circuito intermediário.....	144
4.4 – Choques de carga no circuito intermediário.....	146
5. Retificadores.....	149
5.1 – Retificadores básicos em ponte de diodos.....	150
5.1.1 – Contator de linha na alimentação do retificador.....	151
5.1.2 – Proteção de curto-circuito do retificador.....	152
5.1.3 – Reatores de linha na alimentação do retificador.....	154
5.1.3.1 – Reator de comutação.....	155
5.1.3.2 – Redução de componentes harmônicas.....	156
5.2 – Retificadores básicos em ponte de tiristores.....	160
5.2.1 – Circuito de pré-carga do retificador a tiristor.....	161
5.2.2 – Fator de potência para a rede de alimentação.....	162
5.2.3 – Frenagem regenerativa com retificador a tiristor.....	163
5.3 – Retificadores básicos em ponte de transistores.....	165
5.4 – Retificadores especiais em ponte de transistores.....	167
5.4.1 – Rede de alimentação sob harmônicas.....	167
5.4.2 – Soluções para o convívio com as harmônicas.....	175
5.4.3 – Não produção de harmônicas.....	179
5.5 – Conversores pwm em média tensão.....	186
5.5.1 – Conversores pwm em três níveis, média tensão.....	186
5.5.2 – Conversores pwm de baixa tensão em média tensão.....	189
5.6 – Dimensionamento de conversores e inversores.....	193

6. Comando e malhas de regulação	201
6.1 – Programação – parametrização	201
6.2 – Sistemas de comando	202
6.3 – Estados do sistema	206
6.4 – Formação de valores desejados – setpoints	207
6.5 – Formação de valores reais.....	209
6.6 – Canal de valores desejados – canal de setpoint	211
6.7 – Malhas de regulação	213
6.7.1 – Malhas aberta	214
6.7.2 – Malha fechada	220
6.7.2.1 – Resposta dinâmica	220
6.7.2.2 – Resposta dinâmica em motores de corrente contínua.....	221
6.7.2.3 – Transformação de coordenadas – eixos d e q	223
6.7.2.4 – Controle vetorial	224
6.7.2.5 – Malha de regulação de corrente para o controle vetorial.....	228
6.7.2.6 – Processos bo e so para otimização de reguladores	230
6.7.2.6.1 – Processo bo	231
6.7.2.6.2 – Processo so	235
6.7.2.6.3 – Formação do fluxo e da corrente id	238
6.7.2.6.4 – Importantes comentários sobre as malhas de regulação.....	239
6.7.2.6.4.1 – Levantamento dos parâmetros da máquina	239
6.7.2.6.4.2 – Levantamento dos parâmetros da mecânica	240
6.7.2.6.4.3 – Medição da velocidade real	241
6.7.2.6.4.4 – Alterações do momento de inércia na operação.....	242
6.7.2.6.4.5 – Operação mestre-escravo	244
6.7.2.7 – Malha de regulação de posição.....	247
6.7.2.7.1 – Formação de conhecimentos básicos iniciais	247
6.7.2.7.2 – Pré-controle de velocidade.....	257
6.7.2.7.3 – Encoder para medição de posição.....	259
6.7.2.7.3.1 – Encoder – gerador de pulsos	260
6.7.2.7.3.2 – Resolver.....	262
6.7.2.7.3.3 – Encoder seno-cosseno	265
6.7.2.7.3.4 – Encoder absoluto – seno-cosseno.....	267
6.7.2.7.4 – Referência de posição – referenciamento	271
6.7.2.7.4.1 – Referenciamento passivo.....	272
6.7.2.7.4.2 – Referenciamento ativo.....	273
6.7.2.7.4.2.1 – Via sensor externo.....	273
6.7.2.7.4.2.2 – Via zero do encoder	274
6.7.2.7.4.2.3 – Via sensor externo e zero do encoder	275
6.7.2.7.4.3 – Limites de máquina – deslocamento linear e módulo	276
6.7.2.7.4.4 – Monitoração de deslocamentos	278
6.7.2.7.4.4.1 – Monitoração de acompanhamento	278
6.7.2.7.4.4.2 – Monitoração de posicionamento.....	279
6.7.2.7.4.5 – Programas de posicionamentos motion control.....	280
6.7.2.7.4.6 – Programas de sincronismo motion control.....	281

7. Instalação e montagem	285
7.1 – Efeitos da modulação pwm na malha de terra	285
7.2 – Compatibilidade eletromagnética	291
7.2.1 – Ambiente industrial planejado.....	292
7.2.2 – Ambiente industrial em distritos industriais indústrias não planejadas...	294
7.2.3 – Ambiente industrial em áreas residenciais – comerciais – indústrias não planejadas	297
7.3 – Configurações de redes de alimentação	299
7.3.1 – Rede tn.....	300
7.3.2 – Rede tt	301
7.3.3 – Rede it	302
7.4 – Considerações para aplicar conversor de frequência em redes it	302
7.5 – Outras considerações sobre compatibilidade eletromagnética	304
7.6 – Efeitos da modulação pwm nas máquinas	308
7.6.1 – Máquinas em ambiente industrial planejado.....	309
7.6.2 – Máquinas em ambiente industrial não planejado	315
7.7 – Considerações sobre montagem de conversores de frequência em painéis elétricos – salas elétricas.....	316
7.7.1 – Considerações gerais.....	316
7.7.2 – Considerações sobre o meio ambiente	318
Desejos de sucessos.....	321
Referências bibliográficas	323

2

MOTORES

Um sistema de acionamento, simples ou sofisticado, tem como principal objetivo atender às necessidades da carga. Pode até fazer maravilhas, mas se não fizer o que a carga necessita, não serve para nada. Por desconhecimento ou desatenção, muitos atuam nos sistemas de acionamento sem levar em consideração o comportamento da carga e passam por dificuldades, chegando erroneamente a desqualificar o equipamento.

Isto nos obriga a definir dois conceitos fundamentais: a carga define a necessidade; o sistema de acionamento define a capacidade. Quando a capacidade é maior ou no mínimo igual à necessidade, o sucesso é garantido. Portanto, é tarefa do profissional responsável fazer com que a capacidade atenda à necessidade. Para que isto aconteça, a necessidade exigida pela carga deve ser conhecida, o que procuramos mostrar no capítulo anterior. Em suma o conhecimento do comportamento da carga é o ponto inicial para o êxito de uma aplicação.

Se no capítulo 1 apresentamos a necessidade da carga, vamos mostrar neste e nos posteriores a capacidade do sistema de acionamento. Uma vez conhecida qual é a necessidade e a capacidade, ambos serão confrontados para o atendimento da aplicação.

O motor, parte importantíssima do sistema de acionamento, a ser tratado nos passos seguintes, pode ser: assíncrono de gaiola, assíncrono de anéis, síncrono e servomotores. Não se pretende fazer aqui um trabalho profundo a respeito disso, uma vez que existem uma infinidade de livros, apostilas, cursos, etc. que tratam de cada tipo em seus mais profundos detalhes. O que se pretende é focalizar pontos a serem observados para o uso deles em aplicações de velocidade variável. Vamos focar somente nos mais utilizados nas aplicações industriais, que são o motor assíncrono de gaiola e os

servomotores. No entanto, vale ressaltar que os conhecimentos adquiridos a partir destas duas categorias ajudarão nas aplicações para outros tipos de motores.

2.1 – Motor assíncrono de gaiola

2.1.1 – Curva característica de torque x velocidade – $M \times \eta$

Da mesma forma em que foram apresentadas as cargas em curvas representativas da necessidade de torque em função da variação de velocidade, também vamos exibir a curva de capacidade do motor assíncrono de gaiola com as mesmas características.

Conhecendo-se a necessidade da carga e a capacidade do motor, é possível partir para a especificação do sistema de acionamento. A necessidade sempre deve ser confrontada com a capacidade. Para o motor assíncrono de gaiola, estamos mapeando a sua curva característica típica de torque em função da velocidade, considerando que o motor é conectado diretamente na rede de alimentação. Esta curva tem o formato de sela de cavalo, conforme apresentado a seguir.

Alguns pontos importantes desta curva devem ser observados. Foram levantados valores médios para os motores, que terão as características mais utilizadas no mercado de aplicação industrial, tomando-se valores normais de catálogos de alguns fabricantes:

Torque de partida - M_p – Varia entre 2 a 2,5 vezes o torque nominal do motor.

Torque máximo - M_{max} – Varia entre 2,5 a 3 vezes o torque nominal do motor.

A velocidade n_k se refere à velocidade em que o motor apresenta seu torque máximo e a velocidade n_N diz respeito à velocidade nominal do motor, valor este fornecido em sua placa de dados. A velocidade nominal ocorre quando o motor está realizando seu torque nominal M_N . A velocidade n_s se refere à velocidade síncrona do motor, ou seja, do campo girante dentro dele. Ocorre quando o motor está operando a vazio, isto é, totalmente sem carga,

desconsiderando os esforços provocados pelo atrito em seus mancais e pelo sistema de ventilação. É calculada pela seguinte fórmula:

n_s – velocidade síncrona;

f – frequência nominal;

p – número de pares de polos do motor

Para 60Hz, tem-se:

$n_s = 3.600 \text{ rpm} \rightarrow p = 1$ par de polos;

$n_s = 1.800 \text{ rpm} \rightarrow p = 2$ pares de polos;

$n_s = 1.200 \text{ rpm} \rightarrow p = 3$ pares de polos;

$n_s = 900 \text{ rpm} \rightarrow p = 4$ pares de polos;

Para 50 Hz, as velocidades são de 3.000 rpm, 1.500 rpm, 1.000 rpm e 500 rpm, respectivamente.

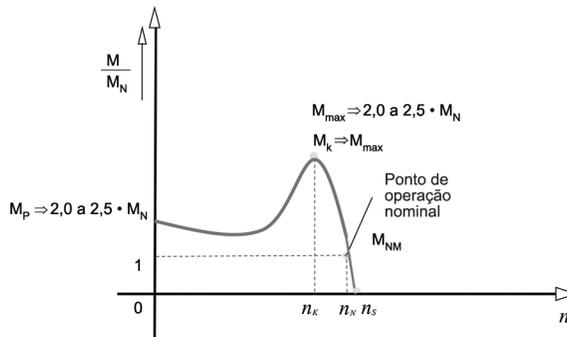


Figura 2.1 – Curva característica de conexão direta na rede

Vamos considerar que o motor é conectado diretamente à rede de alimentação com sua correspondente tensão e frequência nominais; que o motor esteja a vazio, ou seja, sem nada conectado à sua ponta de eixo motora; e que o torque de partida M_p seja duas vezes o torque nominal, conforme a curva característica mostrada na figura 2.1, por exemplo. Nessas condições, a partida irá produzir a evolução da velocidade, iniciando com a velocidade zero e com o motor realizando um torque igual ao seu torque de partida.

Como a carga é zero, com motor a vazio, todo o torque do motor estará disponível para promover a aceleração, aumentando assim a velocidade. Seguindo a curva característica, o torque reduz um pouco, mas como ainda é maior que o solicitado pela carga, o motor continua acelerando e aumentando a sua velocidade. Na sequência, o torque vai aumentando até chegar ao torque máximo, quando a velocidade do motor chega à velocidade n_k . A partir daí, o torque vai diminuindo, mas como a carga é zero, o torque-motor é todo acelerante, aumentando a velocidade do motor.

Quando chega à velocidade nominal n_N , o motor está realizando o torque nominal, mas o torque ainda é acelerante e a velocidade continua aumentando. Seguindo a curva, o torque segue diminuindo, mas ainda é maior do que a carga, e a velocidade aumenta. Quando o torque do motor é zero, igualando-se ao torque solicitado pela carga (não se esqueça: o motor está a vazio), não há mais torque acelerante. O motor faz o torque solicitado pela carga, ou seja, produz torque-motor zero, e opera na velocidade próxima da síncrona n_s .

Esse processo de aceleração só para quando o torque-motor é igual ao torque de carga, o que deixa o motor na velocidade que atende a esta condição – neste caso, a velocidade síncrona, pois a carga é zero. A figura 2.2 mostra essa evolução da velocidade e do torque.

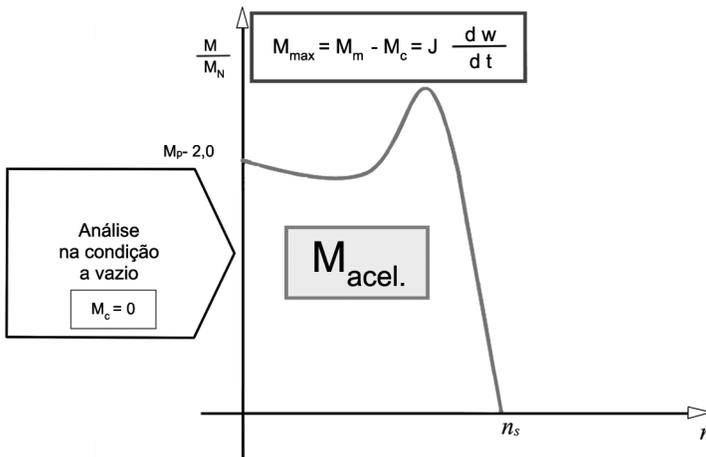


Figura 2.2 – Curva característica: evolução do torque com a velocidade

Esta é a partida mais rápida que um motor pode fazer, pois toda a sua capacidade de torque será utilizada para acelerar a si próprio, uma vez que está em vazio. Estando o motor com carga ou vazio, a curva característica de torque do motor é a mesma. Isto significa que quanto mais carga, o motor estiver arrastando mais tempo ele leva para partir, pois sua capacidade de torque continua sendo igual.

2.1.2 – Curva característica de corrente x velocidade – $i \times \eta$

Para que o motor produza a sua capacidade de torque conforme a curva característica apresentada anteriormente, o motor puxa da rede uma corrente, que apresenta a seguinte curva (figura 2.3).

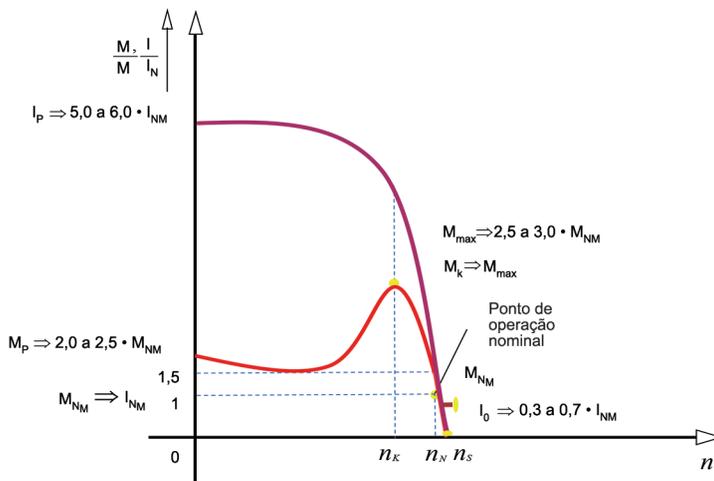


Figura 2.3 – Curva característica de corrente-velocidade

Alguns pontos importantes desta curva devem ser observados. Foram considerados valores médios para os motores, que terão as características mais utilizadas no mercado industrial, tomando-se valores normais de catálogos de alguns fabricantes:

Corrente de partida - I_p

Varia entre cinco a seis vezes a corrente nominal do motor, embora existam normas internacionais que estabelecem correntes de partida de até seis vezes. Alguns motores chegam a precisar de até nove vezes o valor da corrente nominal para executar um torque de partida de 2,5 a três vezes o torque nominal – diz-se que este modelo é muito ruim para partidas, pois demanda muita corrente para pouco torque.

Acompanhando a curva característica, à medida que a velocidade sobe a corrente se mantém ainda alta. Após passar pelo ponto de torque máximo, vai abaixando de forma mais considerável. Neste ponto, a corrente ainda é alta, podendo chegar de quatro a cinco vezes a corrente nominal. Quando o motor chega à velocidade nominal, executa o torque nominal, puxando da rede a corrente nominal.

Da mesma forma que fizemos com o torque para partida de motor sem carga, vamos acompanhar a curva característica de corrente do motor sob as mesmas condições. Isto é, considera-se que o motor esteja conectado diretamente à rede de alimentação, com sua correspondente tensão e frequência nominais, e a vazio (sem nada conectado à sua ponta de eixo motora). Leva-se também em conta, como na curva característica mostrada anteriormente, que o torque de partida M_p seja duas vezes o torque nominal e a corrente de partida I_p seja seis vezes a corrente nominal.

A partida produzirá a evolução da velocidade a partir do zero, com o motor realizando um torque igual ao seu torque de partida e puxando da rede uma corrente igual à sua corrente de partida. Como a carga é zero (motor a vazio), todo o torque do motor estará disponível para promover a aceleração, aumentando assim a velocidade. Seguindo a curva característica, a corrente se mantém praticamente constante mesmo quando o torque reduz um pouco, mas, como ainda é maior que o torque solicitado pela carga, o motor continua acelerando e aumentando a sua velocidade, mas a corrente se mantém praticamente igual à de partida.

Em sequência, o torque vai aumentando até chegar ao valor máximo. Neste ponto, a corrente diminui um pouco, mas ainda é elevada, pois alcança valores da ordem de quatro a cinco vezes a corrente nominal, e a velocidade do motor chega à velocidade n_k . A partir daí, o torque e a corrente vão diminuindo, mas, como a carga é zero, o torque-motor é todo acelerante. A velocidade do motor, portanto, aumenta. Quando chega à velocidade nominal n_N , o motor está realizando o torque nominal e a corrente é a corrente nominal,

mas o torque-motor ainda é acelerante e a velocidade do motor continua aumentando, uma vez que o motor está a vazio.

Dando continuidade à curva característica, a corrente e o torque do motor diminuem. Depois de um tempo, a corrente não diminui mais, ficando a um valor constante, que corresponde à corrente a vazio do motor. Mesmo com a redução no torque do motor, o torque-motor é maior que a carga, o que causa aumento de velocidade. Quando o torque é zero, valor igual ao que é solicitado pela carga (mais uma vez: o motor está a vazio), não há mais torque acelerante e o motor faz o torque solicitado pela carga, ou seja, produz torque-motor zero. A corrente fica constante e igual à corrente a vazio, enquanto o motor opera na velocidade próxima à síncrona n_s . Este processo da aceleração só acontece quando o torque-motor fica igual ao torque de carga, deixando o motor na velocidade que atende a esta condição – neste caso, a velocidade síncrona, pois a carga é zero, com o motor a vazio.

Como vimos anteriormente, a menor corrente que o motor faz, mesmo estando completamente sem carga, é a corrente a vazio. O valor desta corrente a vazio é variável, podendo estar entre 30% a 70% da corrente nominal, dependendo do tipo e/ou do tamanho do motor.

Acima da corrente nominal, ou seja, em situação de sobrecorrente, existe uma linearidade entre a corrente e o torque que chega ao máximo de 150% da corrente nominal. Neste caso, quando a corrente aumenta, o torque sobe na mesma proporção. Por exemplo, quando o motor consome 100% da corrente nominal, também faz 100% do torque nominal. Quando o motor consome 120% da corrente nominal, faz 120% do torque nominal. Quando o motor consome 150% da corrente nominal, faz 150% do torque nominal.

No entanto, quando o motor consome 180% da corrente nominal, isto não significa que o motor faz 180% do torque nominal. Acima de 150%, a curva de torque não é linear com a curva de corrente: o motor consome muito mais corrente do que efetivamente realiza de torque, o que representa uma situação nada interessante. É contraproducente trabalhar com sobrecorrente acima de 150% da corrente nominal porque uma grande quantidade de corrente é consumida para a produção de pouco torque. Repare que o motor foi feito para produzir torque e, para isso, necessita de consumir corrente, que idealmente deve ser a menor possível, pois é neste cenário que o motor trabalha na faixa linear entre corrente e torque. Veja a curva demonstrativa na figura 2.4.

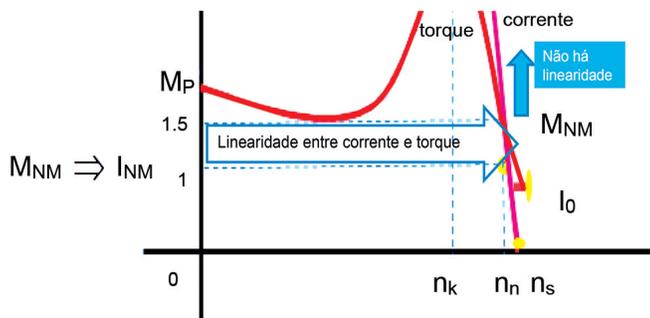


Figura 2.4 – Linearidade entre corrente e torque

Em relação à corrente que o motor puxa da rede, medida com amperímetro, a verdade é que existem duas correntes, embora a informação de medida seja de um único valor. A corrente medida é a corrente aparente, formada por duas outras: a ativa e a reativa. A corrente ativa é responsável pelo torque, enquanto a reativa diz respeito ao fluxo do motor.

O fluxo é a alma do motor. Se ele existir, a máquina tem condições de produzir torque, ou seja, está viva. Sem isso, não passa de um montão de metais. Por outro lado, quando o fluxo é o nominal da máquina, dá possibilidade de que o motor realize a sua capacidade nominal de torque. Para que o fluxo possa existir, necessita da corrente reativa. O fluxo nominal ocorre com a corrente reativa nominal. Mesmo que não faça nada, a máquina precisa do fluxo – ou seja, consome corrente reativa – para existir. As equações que representam essas grandezas são:

- M – torque do motor;
- k – constante construtiva da máquina;
- Φ – fluxo da máquina;
- I_w – corrente ativa ;
- I_Q – corrente reativa ;
- f – frequência da máquina;
- V – tensão da máquina

Observe pelas equações acima que a corrente que produz fluxo, a reativa, é proporcional à relação V/f . Quando se trata de variação de velocidade de um motor de corrente alternada, é necessário alternar a frequência, e por tabela também a frequência. Desta forma, mantém-se a relação V/f , ou seja,

o fluxo constante, pois assim a capacidade de torque do motor permanece constante.

O fluxo é produzido pelas bobinas do estator e do rotor do motor. Sendo um motor trifásico, avaliam-se as bobinas do estator e do rotor, considerando apenas uma das fases. Esta análise será desenvolvida em partes, tomando por analogia as bobinas do primário e do secundário de um transformador (figura 2.5), sendo que a primeira representa o estator e a segunda, o rotor. Neste caso, a bobina do rotor se encontra em curto-circuito para representar o motor assíncrono de gaiola.

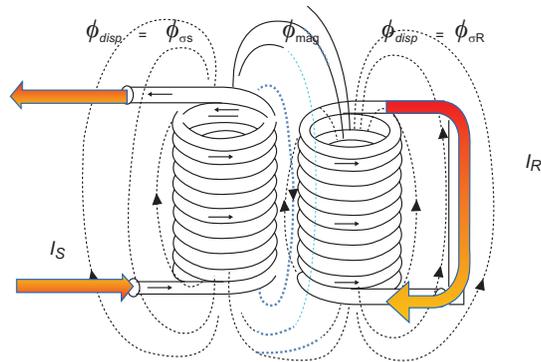


Figura 2.5 – Analogia com as bobinas do primário e do secundário do transformador

Havendo corrente I_s no estator, ou seja, ao passar pela bobina do estator essa corrente irá produzir fluxo. Uma parte deste fluxo abraça a bobina do rotor e induz tensão. No entanto, como o rotor está em curto-circuito (motor assíncrono em gaiola), esta tensão induzida é convertida em corrente rotórica, que produz fluxo rotórico. Uma parte deste fluxo rotórico alcança o estator, fazendo acoplamento entre o rotor e o estator, e é responsável pela produção de torque da máquina. O fluxo de acoplamento entre rotor e estator é o fluxo magnetizante F , que é o fluxo que produz torque, em atendimento da fórmula:

Outras linhas de fluxo, produzidas pelo estator e pelo rotor, não alcançam seus objetivos: as linhas produzidas pelo estator não alcançam o rotor e vice-versa. Essas linhas se chamam fluxo de dispersão, não produzem torque e apenas causam perdas magnéticas na máquina. O fluxo de dispersão do estator está representado por $\Phi_{\sigma s}$ e o fluxo de dispersão do rotor, por $\Phi_{\sigma R}$.

O diagrama elétrico por fase, simbolizando todos estes efeitos, é apresentado na figura 2.6. As perdas de dispersão são representadas pela indutância e

pela correspondente reatância de dispersão do estator e do rotor em cada uma das respectivas partes do circuito. A indutância e a correspondente reatância de acoplamento, que representa o efeito de transferência de torque entre estator e rotor, estão representadas pela Φ_{mag} , pertencente a ambas as partes do estator e rotor.

As fiações das bobinas do estator e do rotor são feitas de cobre ou de alumínio, material que oferece resistência à passagem da corrente. Estas resistências do estator (representada por R_S) e do rotor (representada por R_R) se encontram também apresentadas no diagrama elétrico por fase. A resistência variável R_C representa a carga.

O fluxo nominal é obtido quando o motor é alimentado com a tensão nominal e a frequência nominal.

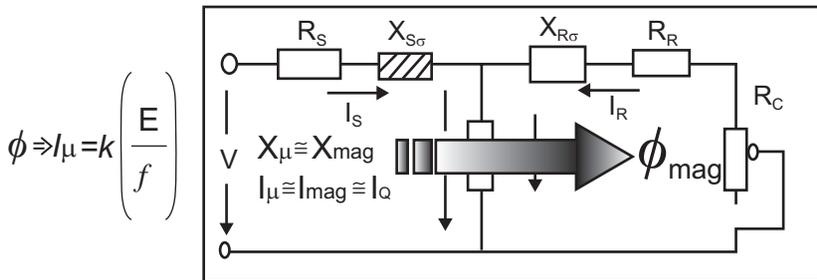


Figura 2.6 – Diagrama elétrico por fase

Para que o fluxo nominal no motor se mantenha em qualquer velocidade, é necessário que, correspondentemente à variação da frequência, aconteça a variação de tensão, de forma a manter a relação V/f :

2.1.3 – Curvas características $M \times \eta$ e $I \times \eta$ com a variação de velocidade

Vimos que o torque produzido por uma máquina de corrente alternada é proporcional ao produto do fluxo pela corrente ativa. Também já falamos que o fluxo é proporcional à relação V/f . A relação V/f é um fator muito importante na variação da velocidade de máquinas, pois, além de o fluxo nominal ser diretamente proporcional, o torque máximo M_{max} é proporcional

ao quadrado desta fórmula. Ocorrem dois efeitos para o torque máximo: 1) o fluxo magnético, devido à reatância indutiva do estator; 2) a corrente máxima possível do rotor curto-circuitado, que é a corrente que produz torque, em razão da reatância indutiva do rotor. Ambos produzem um efeito ao quadrado da relação V/f para o torque máximo.

Assim, as principais equações para o entendimento do comportamento da operação de máquinas em corrente alternada em variação de velocidade são resumidamente apresentadas a seguir:

Primeiramente, vamos desenvolver um entendimento teórico e, a seguir, apresentar os limites práticos dessa funcionalidade.

2.1.3.1 – Desenvolvimento teórico

Iniciando-se com a curva característica típica de torque em função da velocidade (figura 2.7) e considerando que o motor é diretamente conectado à rede de alimentação, vamos desenvolver a curva característica em velocidade e frequência variáveis.

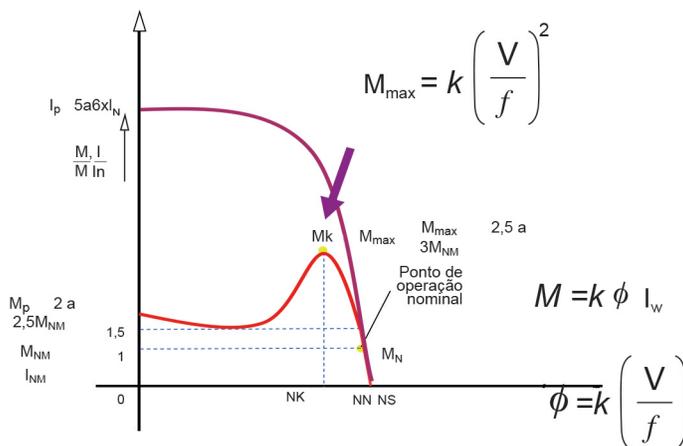


Figura 2.7 – Curvas características: $M \times \eta$ e $I_p \times \eta$

Mais uma vez: para variar a velocidade, tem-se que variar a frequência. A frequência pode ser variada, conforme as necessidades da carga, desde a

frequência zero até certa frequência máxima, tanto para rotação em um sentido quanto para o inverso. A frequência máxima é definida conforme a operação ou a capacidade do sistema. Inicialmente, vamos analisar a operação para frequências abaixo e, em seguida, acima da nominal.

2.1.3.2.1 – Operação em frequência abaixo da nominal

Ao variar a frequência, para manter o fluxo constante, tem-se que variar a tensão juntamente com a frequência conforme a relação V/f. Como o torque máximo M_{\max} é proporcional à relação V/f ao quadrado, permanece constante para qualquer frequência.

O torque de operação do motor é proporcional à corrente ativa e ao fluxo, que é mantido constante pela relação V/f. Como o fluxo nominal permanece constante, assim como a corrente ativa e a nominal, o torque de operação do motor fica constante e o nominal, para qualquer frequência de operação.

Observando a curva característica típica de torque do motor (figura 2.8), em formato de sela de cavalo, verificamos que ela se desloca conforme a frequência, mas o torque máximo sempre é constante. O torque nominal do motor também permanece nestas condições.

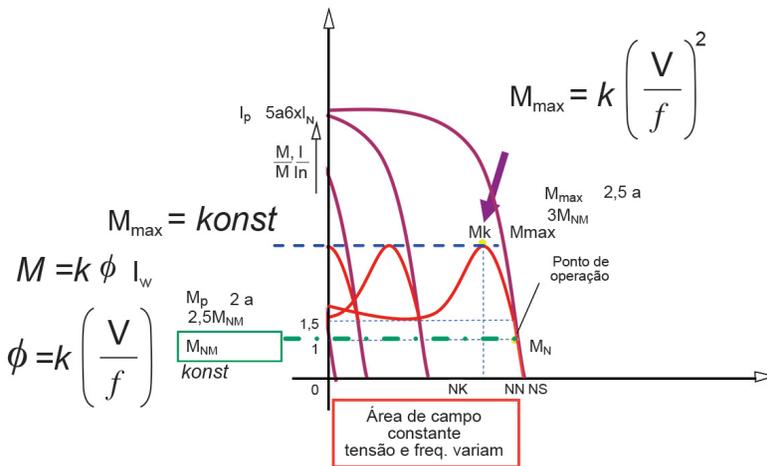


Figura 2.8 – Curvas características: operação abaixo da velocidade nominal

A curva característica típica de corrente do motor se desloca conforme a frequência. Deve-se observar também que o ponto de corrente de partida

diminui quando a frequência baixa. E abaixa tanto mais quanto menor for a frequência, sendo que, na partida, com frequência muito baixa, a corrente pode ser tão baixa quanto a solicitada pela carga, ou seja, algo em torno da corrente nominal do motor.

Importante: A capacidade do motor se mantém a mesma de quando ele é conectado diretamente à rede de alimentação, ou seja, pode ser mantido o torque nominal constante para qualquer velocidade abaixo da frequência nominal.

2.1.3.1.2 – Operação em frequência acima da nominal

Ao variar a frequência acima da nominal, para manter o fluxo constante, dever-se-ia aumentar a tensão acima da nominal em correspondência à relação V/f . Entretanto, isto se torna impossível, pois a tensão do sistema é a nominal do motor e não há mais tensão na rede de alimentação para que se possa aumentar a tensão correspondente à relação V/f . Assim, a partir da frequência nominal, a tensão se mantém nominal e constante. Com o aumento da frequência, o fluxo diminui correspondentemente, entrando na operação com enfraquecimento de campo.

O torque máximo M_{\max} é proporcional à relação V/f ao quadrado. Aumentando-se a frequência, com a tensão mantida constante e nominal, ele se reduz inversamente ao quadrado da frequência. Trata-se de uma grande redução, uma vez que se refere ao inverso da frequência ao quadrado.

O torque de operação do motor é proporcional à corrente ativa e ao fluxo, que é enfraquecido pelo aumento da frequência com a tensão mantida constante na nominal. Como o fluxo está enfraquecido, mesmo que a corrente ativa seja mantida na nominal, o torque de operação do motor fica reduzido correspondentemente ao inverso da frequência.

Observa-se na figura 2.9 que o torque de operação do motor se reduz com o inverso da frequência. Enquanto isso, o torque máximo diminui mais acentuadamente com o inverso do quadrado da frequência. Neste caso, pode-se alcançar um ponto da operação em que o torque máximo tende a ficar menor que o de operação, impossibilitando a operação do sistema.

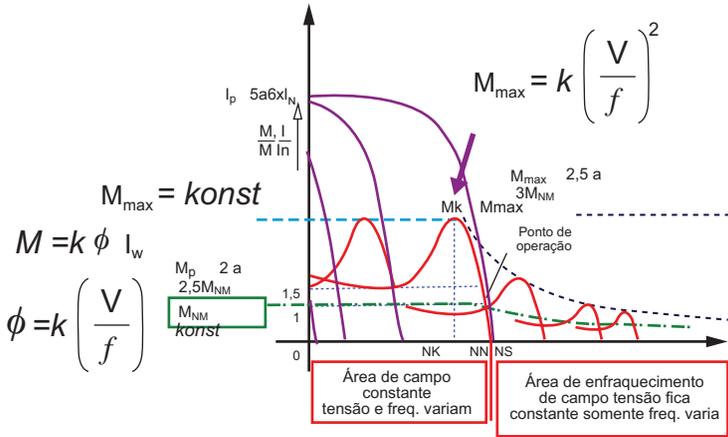


Figura 2.9 – Curvas características: operação acima da velocidade nominal

Observando-se a curva característica típica de torque do motor, em formato de sela de cavalo, é possível notar que a curva se desloca conforme a frequência, mas com o torque máximo diminuindo com o inverso do quadrado da frequência. Dentro destas mesmas condições, veja que o torque nominal do motor diminui com o inverso da frequência (figura 2.10).

Importante: A capacidade nominal do motor diminui para velocidades acima da nominal se comparada à condição de quando o motor é conectado diretamente à rede de alimentação.

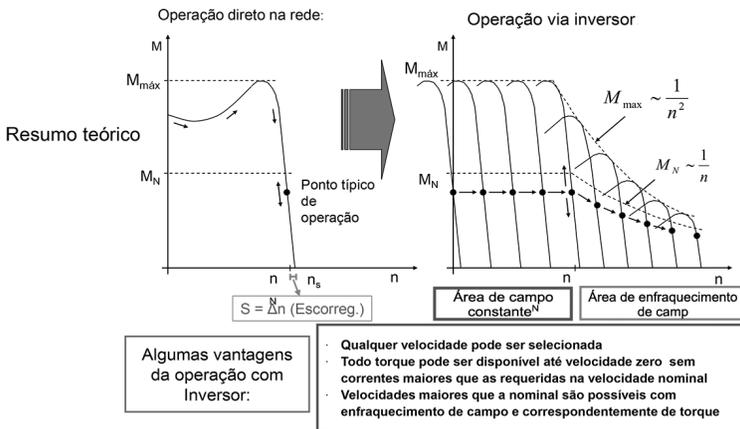


Figura 2.10 – Curvas características: operação na rede – operação com frequência variável

2.1.3.2 – *Desenvolvimento prático*

Da mesma forma em que o capítulo 1 abordou as cargas em curvas representativas da necessidade de torque em função da velocidade, que é variável, agora vamos desenvolver a mesma curva de capacidade do motor assíncrono de gaiola em função da variação da velocidade, levando em conta os efeitos práticos da aplicação de motores normais de mercado. Na prática, acontecem algumas situações que, se não foram consideradas durante o desenvolvimento teórico, podem colocar em dúvida o sucesso da aplicação.

Conhecendo-se a necessidade da carga e a capacidade do motor, podemos pensar na especificação do sistema de acionamento. Sempre deve ser confrontada a necessidade com a capacidade. Iniciando-se com a curva característica típica de torque em função da velocidade e considerando as teorias anteriormente apresentadas, vamos analisar o comportamento prático real do motor em velocidade variável, variando a frequência.

Para variar a velocidade, tem-se que variar a frequência. A frequência pode ser variada, conforme as necessidades da carga, desde a frequência zero até certa frequência máxima, tanto para rotação em um sentido quanto no inverso. A frequência máxima é definida conforme a operação ou a capacidade do sistema. Então, vamos primeiramente analisar a operação para frequências abaixo e, depois, acima da nominal.

2.1.3.2.1 – *Operação em frequência abaixo da nominal*

Conforme foi dito anteriormente, na prática ocorrem certas situações que podem comprometer o sucesso da aplicação se não foram consideradas durante o desenvolvimento teórico. Os motores assíncronos de gaiola normais de mercado têm um ventilador para fazer a refrigeração do motor, que está instalado em sua ponta de eixo traseira e não motora. Ao se variar a frequência para baixo da nominal, reduzindo a velocidade do motor, há diminuição da refrigeração do motor. Por isto, esta nova condição deve ser considerada na aplicação do motor para operação em velocidade variável.

Há duas alternativas para estabelecer a capacidade do motor em condições operacionais em razão da variação de velocidade:

Ventilação externa independente: Os fabricantes de motores já oferecem ao mercado um kit opcional com estas características. A grande

vantagem é a de manter o motor plenamente ventilado em qualquer velocidade. Assim, o motor mantém a sua capacidade plena de utilização de torque nominal, desde a velocidade zero até a nominal, conforme teoria anterior. Para isso, é necessário projetar um sistema de comando e proteção do motor, além de colocar condições de intertravamento, para que o motor principal possa funcionar apenas se o do ventilador também esteja em operação – caso este paralise as suas atividades por qualquer motivo, o motor principal deve fazer o mesmo. Ou seja, é preciso encarecer o projeto e instalar equipamentos adicionais que podem provocar incidência de defeitos, reduzindo o MTBF (tempo médio entre falhas).

Ventilação própria no eixo do motor: A segunda alternativa é usar o ventilador que o motor já tem montado em seu eixo. Desta forma, não há necessidade de se instalar nada adicional. Um motor normal de mercado já atende a esta condição. No entanto, devido à diminuição da ventilação, que é reflexo da redução de velocidade, a capacidade do motor fica mais reduzida quanto menor for a velocidade de operação (figura 2.11). Os fabricantes de motores já estabelecem qual é a redução que ocorre para cada motor de sua fabricação em função da redução da velocidade.

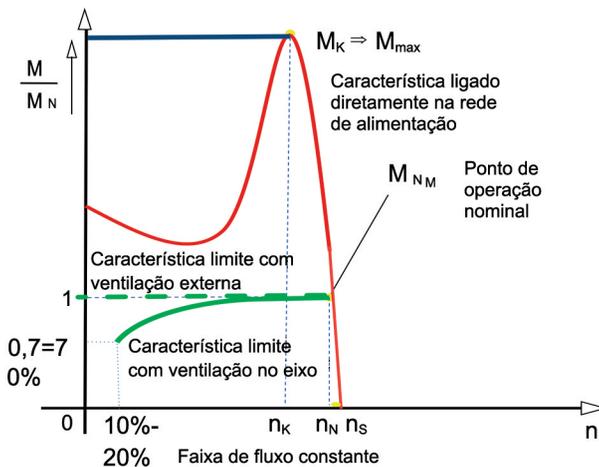


Figura 2.11 – Curvas características: torque-velocidade

Em média, para se ter ideia, o torque do motor é reduzido para 70% do nominal e a velocidade mínima possível de operação se encontra entre 10% e 20% da nominal. Abaixo desta velocidade, o motor fica com refrigeração

tão reduzida que não deve ser operado. A curva característica do motor para operação em frequência abaixo da nominal se apresenta conforme o que foi anteriormente apresentado.

Importante: O motor tem a mesma capacidade de quando é conectado diretamente à rede de alimentação. Por isso, o torque pode ser mantido como o nominal, constante para qualquer velocidade abaixo da frequência nominal, desde que uma ventilação externa separada seja instalada. Se for utilizada a ventilação própria do motor, que se encontra instalada em seu próprio eixo, a capacidade fica reduzida para 70% da nominal e a mínima velocidade de operação fica entre 10% e 20% da nominal.

2.1.3.2.2 – Operação em frequência acima da nominal

Vimos na parte teórica que a partir da frequência nominal a tensão se mantém constante na nominal. E, com o aumento da frequência, o fluxo diminui, entrando na operação com enfraquecimento de campo. O torque de operação do motor é proporcional à corrente ativa e ao fluxo, que é enfraquecido pelo aumento da frequência. Desta forma, mesmo que a corrente ativa seja mantida na nominal, o torque fica reduzido correspondentemente ao inverso da frequência.

O torque de operação do motor diminui com o inverso da frequência e o torque máximo é reduzido, mais acentuadamente, com o inverso do quadrado da frequência. Neste caso, pode-se chegar a um ponto em que o torque máximo tende a ficar menor que o da operação, impossibilitando o funcionamento do sistema. As normas estabelecem que deva existir, no mínimo, 30% de folga entre o torque máximo e o torque de operação do motor em qualquer ponto de sua faixa de velocidade de operação.

Vamos continuar analisando as duas alternativas viáveis para se estabelecer a capacidade do motor em condições operacionais perante a variação de velocidade acima da frequência nominal.

Ventilação externa independente: Continua sendo bastante vantajoso manter o motor plenamente ventilado em qualquer velocidade. Desta forma, ele permanece com a sua capacidade plena de utilização de torque nominal, desde a velocidade nominal até a máxima, que é limitada pelas normas: folga mínima de 30% entre o torque máximo e o de operação. Entretanto, os motores normais de mercado são balanceados para operação de até 20% acima da velocidade nominal. Isto significa que não é garantida a operação acima

de 20% da velocidade nominal por questões mecânicas de balanceamento. Os fabricantes já oferecem a informação de qual seria a máxima velocidade possível de operação para todos os modelos, então a velocidade máxima garantida seria os 20% acima da nominal ou aquela indicada pela empresa responsável.

Com respeito à capacidade de torque, a teoria vista anteriormente é plenamente válida, ou seja, a corrente ativa pode ser mantida constante e a nominal, enquanto o fluxo fica reduzido com o motor operando em enfraquecimento de campo – conseqüentemente, o torque de operação diminui com o inverso da frequência.

Ventilação própria no eixo do motor: Nesta condição, utilizando-se o ventilador que o motor já tem montado em seu eixo, alguns aspectos devem ser levados em conta (figura 2.12).

Subindo a velocidade acima da nominal, a ventilação do motor aumenta, o que faz com que o motor esteja mais bem refrigerado. Entretanto, o torque exigido aumenta ao quadrado, pois o ventilador é uma carga quadrática. Esta carga adicional é suprida pelo próprio motor, que torna maiores as perdas do ventilador do que as normais do motor.

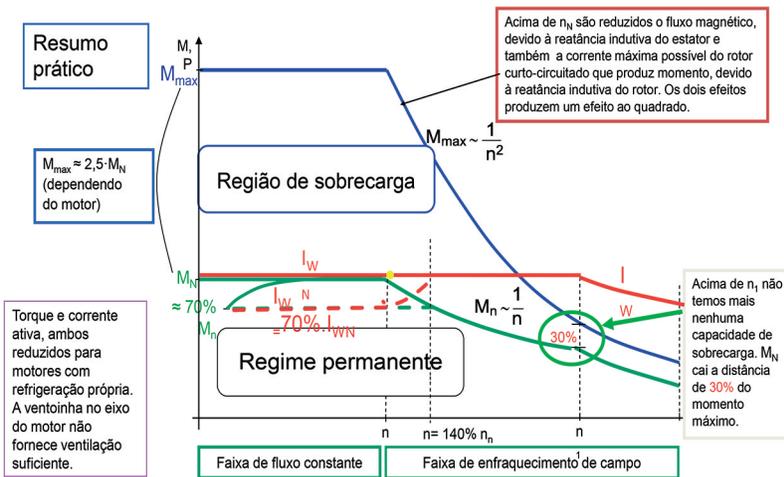


Figura 2.12 – Curvas características da operação

Para a operação em velocidades abaixo da nominal, o motor foi sobredimensionado. Como vimos anteriormente, ele foi projetado para ser utilizado

em apenas 70% de seu torque nominal e, assim, a corrente ativa alcançar apenas 70% da corrente ativa nominal. Para velocidades acima da nominal, o motor é bem ventilado, permitindo que se possa utilizar a plena corrente ativa, ou seja, chegar a 100%. Para ser realizado o torque de 70% com a corrente ativa em 100%, o fluxo pode ser reduzido para 70%, o que é conseguido a uma frequência de 140% acima da nominal. Desta forma, até onde o motor puder manter o torque constante em 70% do nominal, o ponto vai para acima da velocidade nominal. Na frequência de 140% da nominal, o fluxo cai para 70% do nominal e o torque fica 70% do nominal se a corrente ativa atingir 100% da nominal. A partir deste ponto, tanto motores com ventilação externa separada quanto com ventilação própria têm as mesmas capacidades.

Dependendo da aplicação, para velocidades muito altas, havendo a queda do torque máximo com o quadrado inverso da frequência e da queda do torque de operação com o inverso da frequência, chega-se a um ponto em que as normas limitam o aumento da frequência – existindo, claro, a relação entre torque máximo e torque de operação em no mínimo 30%. Para que esse valor mínimo seja mantido, mesmo aumentando-se a velocidade, a corrente ativa deve ser reduzida para valores abaixo da nominal, tanto mais quanto maior for a aceleração. Essa redução inicia-se a partir da velocidade n_1 indicada na curva característica anterior. Como nesta curva o torque máximo foi considerado como sendo $2,5 \cdot M_N$, a velocidade n_1 chega a 190% da nominal.

Anteriormente, foi apresentada a curva característica completa do motor para frequências acima e abaixo da nominal com o objetivo de dar uma visão geral de toda a análise prática.

2.1.4 – Cálculo da corrente do motor em velocidade variável

A corrente nominal do motor é dado de placa e também consta em catálogos dos fabricantes. Em variações da velocidade do motor, se faz necessário entender como se comporta a corrente nessas condições. Sabemos que a corrente aparente (corrente total medida) contém na verdade duas correntes: a ativa e a reativa. A corrente ativa é a responsável pelo torque e a corrente reativa, pelo fluxo. Para relembrar, as equações abaixo representam essas definições:

Onde:

M – torque do motor;

k – constante construtiva da máquina;

Φ – fluxo da máquina;

I_w – corrente ativa;

I_Q – corrente reativa ;

f – frequência da máquina;

V – tensão da máquina

Assim como no triângulo de potências (aparente, ativa e reativa), temos também o triângulo de correntes (figura 2.13), que engloba a corrente aparente, a ativa e a reativa.

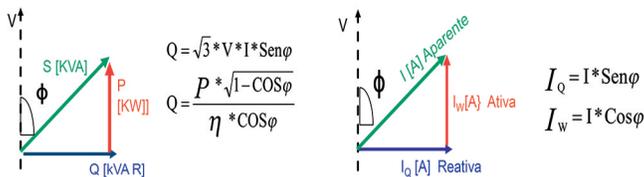


Figura 2.13 – Triângulo de potências – triângulo de correntes

No ponto nominal de operação, os dados de catálogo fornecem a corrente nominal e o fator de potência nominal. Desta forma, a corrente ativa e a corrente reativa nominal são conhecidas, assim como o ângulo Φ nominal de defasagem entre a tensão e a corrente aparente, ângulo do fator de potência nominal. Para a variação de velocidade, abaixo da nominal, é mantida a relação V/f constante, de maneira que a corrente reativa é mantida constante e a nominal.

Vamos analisar várias situações de carga para velocidade abaixo da nominal, iniciando-se com o motor em vazio. O torque realizado é zero, assim como a corrente ativa. Veja o triângulo das correntes na figura 2.14. A corrente reativa é a nominal.

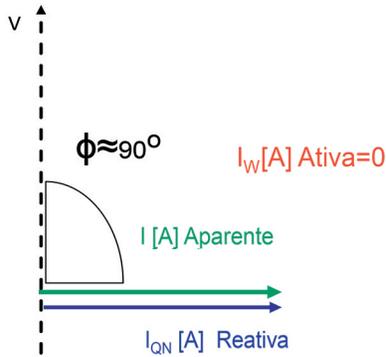


Figura 2.14 – Corrente ativa – operação motor em vazio

Para uma carga menor que a nominal, portanto, um torque menor que o nominal, a corrente ativa é menor do que a ativa nominal. Por exemplo, se a carga for 20% da nominal, a corrente ativa é 20% da nominal. A partir daí, calcula-se a corrente aparente total (figura 2.15).

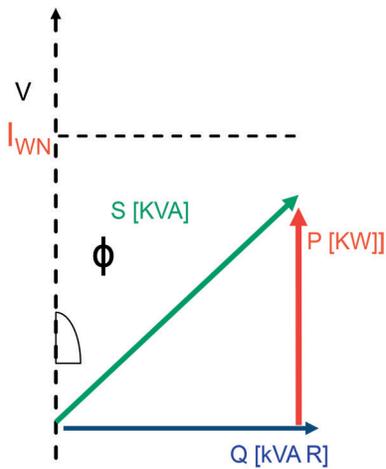


Figura 2.15 – Corrente ativa – operação com carga abaixo da nominal

Para uma carga maior do que a nominal, o que leva a um torque maior do que o nominal, a corrente ativa é maior do que a nominal. Por exemplo,

se a carga for 120% da nominal, a corrente ativa é 120% da nominal. A partir daí, calcula-se a corrente aparente total (figura 2.16).

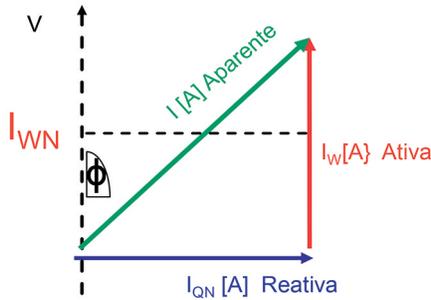


Figura 2.16 – Corrente ativa – operação com carga acima da carga nominal

Os cálculos das correntes ativas e reativas nominais expressos nas fórmulas acima fornecem valores aproximados, pois as relações físicas são muito complexas. Há o perigo de que ocorra um subdimensionamento quando aplicadas na prática. Por meio de uma variação da fórmula de cálculo da corrente reativa, conforme é apresentado abaixo, consegue-se ir para o lado mais seguro, ainda que conduza algumas vezes a sobredimensionamento. Neste caso, a sugestão é que a fórmula:

$$I_{QN} = I_N \cdot \text{sen } \phi_N = I_N \cdot 1 - \cos^2 \phi_N$$

seja substituída pela fórmula:

$$I_{QN} = I_N \cdot 1 - \cos \phi_N$$

E, após isso, a corrente ativa nominal seja calculada por:

$$I_{WN} = I_N^2 - I_{QN}^2$$

Quando há variação de velocidade acima da nominal, ocorre enfraquecimento de campo, pois a tensão é mantida constante e a frequência, aumentada. A corrente reativa fica reduzida (figura 2.17) tanto quanto a frequência é elevada para acima da nominal.

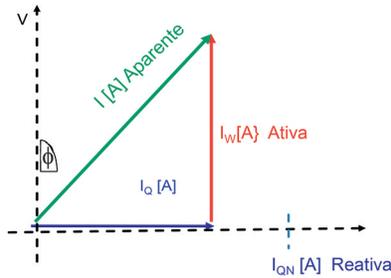


Figura 2.17 – Corrente reativa – operação acima da velocidade nominal

As mesmas situações de carga podem ser analisadas, mas é preciso considerar que a corrente reativa fica reduzida. Para uma velocidade acima da nominal, a corrente reativa diminui pela relação do aumento da frequência, que é a mesma do aumento da velocidade. O cálculo da carga também se mantém da mesma forma já vista. A partir daí, então, a corrente aparente total é calculada.

$$I_{QN} = I_N \cdot 1 - \cos \phi$$

$$I_{WN} = I_N^2 - I_{QN}^2$$

$$I_W = I_{WN} \cdot M/M_N$$

$$I_Q = I_{QN} \cdot f/f_N = I_{QN} \cdot \eta_N/\eta$$

$$I = \sqrt{I_Q^2 + I_W^2}$$

2.1.5 – Potência do motor em velocidade variável

Tratamos em detalhes da capacidade de torque do motor em todas as possibilidades de variação de velocidade. Entretanto, os dados de torque não estão presentes nos dados de placa dos motores normais: ali, estão apenas as informações de potência nominal e velocidade nominal, a partir dos quais o torque nominal pode ser encontrado. Esses dados formam apenas um ponto nas curvas características que já foram apresentadas. Como vimos anteriormente, potência é a velocidade com que um serviço é realizado; torque é o serviço.

Estas definições são expressas pelas seguintes equações:

Em movimento rotativo: $P = M \cdot \omega$

Em movimento de translação: $P = F \cdot v$

A relação entre velocidade linear e rotacional é dada por: $v = \omega \cdot R$

Sendo assim, temos:

$$P = F \cdot v \quad \text{Com: } v = \omega \cdot R$$
$$P = M \cdot \omega \quad \text{Com: } \omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{n}{60 \frac{s}{\text{min}}}$$
$$P = 0,1047 \cdot M \cdot n \cdot \frac{\text{min}}{s} \quad M = \frac{9,55 \cdot P}{n} \cdot \frac{s}{\text{min}}$$

Em resumo:

$$P = M \cdot \omega$$

$$P = 0,1047 \cdot M \cdot \eta$$

P = potência (kW)

M = torque (Nm)

η = velocidade (rpm)

A partir desta fórmula de potência, utilizando-se os dados nominais de potência e rotação, de placa ou de catálogo, determinamos o torque nominal em N.m e definimos todas as curvas características desenvolvidas anteriormente.

Vamos completar as curvas do resumo prático com as curvas características de potência conforme figura 2.18.

velocidade, dos quais foram analisadas as suas respectivas curvas características: torque constante, torque quadrático, torque linear e torque inverso. Isso representa o que chamamos de *necessidade*.

Acabamos de ver as curvas características do motor assíncrono de gaiola. Isso representa o que chamamos de *capacidade*. Vamos agora analisar as condições para que a *capacidade* do motor possa atender às *necessidades* dos diversos tipos de carga. Para isso, é preciso separar as análises de utilização do motor com ventilação própria do seu eixo e com ventilação externa separada, conforme as suas capacidades nas curvas características típicas de torque (figuras 2.19 e 2.20).

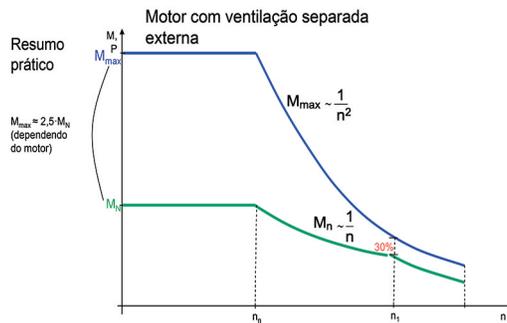


Figura 2.19 – Motor com ventilação separada externa

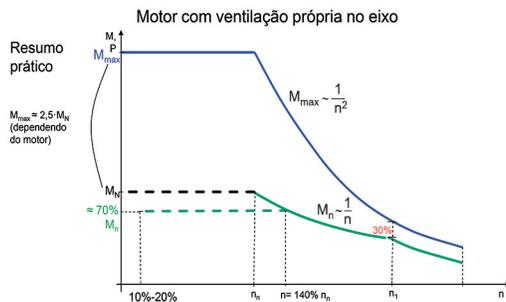


Figura 2.20 – Motor com ventilação própria no seu eixo

Carga de torque constante: Vamos inicialmente analisar o motor acionando este tipo de carga confrontando a capacidade do motor perante a necessidade da carga. Somente para lembrar, cargas que têm essa característica são correias transportadoras, elevadores, guias etc.

Neste caso, o torque-motor pode ser dimensionado igual ao de carga. A carga pode ser operada desde a velocidade zero até a nominal do motor. Para velocidades maiores, deve ser proporcionalmente reduzida. A capacidade de sobrecarga pode chegar a 150% da carga nominal (figura 2.21).

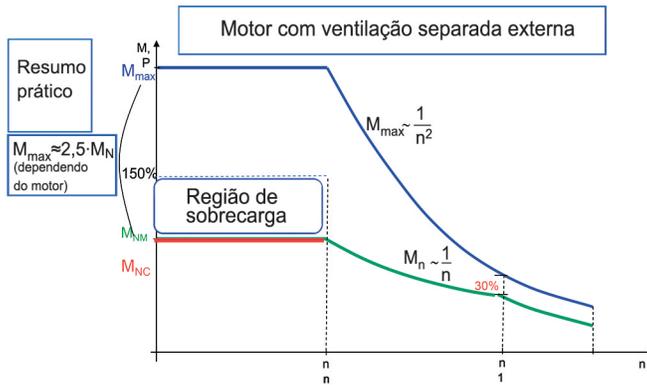


Figura 2.21 – Aplicação para torque de carga constante – ventilação externa separada, velocidade abaixo da nominal do motor

Se a carga necessita ser acionada para uma velocidade maior que a nominal do motor, o motor deve ser tão sobredimensionado quanto maior for a velocidade. A capacidade de sobrecarga é o quanto foi sobredimensionado mais 150% da nominal do motor (figura 2.22).

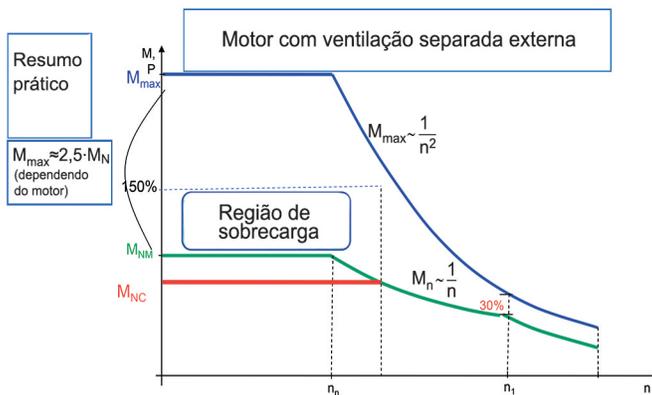


Figura 2.22 – Aplicação para torque de carga constante – ventilação externa separada, velocidade acima da nominal do motor

CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

Para o controle de velocidade dos equipamentos de campo girante, as máquinas de corrente alternada, existem basicamente dois métodos:

- **Frequência constante:** Variação de velocidade pela variação de es-corregamento para uma frequência de rede de alimentação constante.
- **Frequência variável:** Variação de velocidade por meio da alimenta-ção do estator com uma tensão de frequência e amplitude variáveis.

Para que haja possibilidade de que estes controles possam ser realiza-dos, algumas grandezas exercem influências fundamentais e básicas: tensão do estator, resistência do rotor, contratensão do rotor – força contraeletromo-triz e mudança simultânea da frequência com a tensão.

O resumo mostrado na figura 3.1 apresenta as várias tecnologias desen-volvidas durante anos objetivando atender à variação de velocidade.

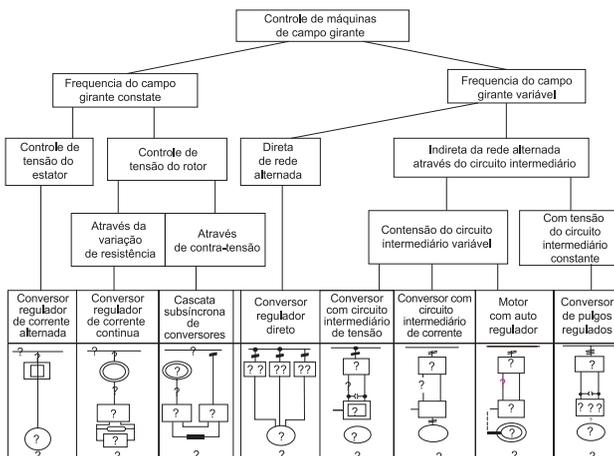


Figura 3.1 – Resumo das tecnologias para variação de velocidade

Essas várias tentativas de buscar a variação de velocidade dos equipamentos de campo girante, as conhecidas máquinas de corrente alternada, ocorreram com a utilização dos recursos existentes em cada época. A ideia sempre foi definir o melhor uso destas máquinas, que sempre tiveram baixas necessidades, ou até mesmo falta de manutenção, além de baixo custo, pouca perda operacional e alta proteção contra a agressividade do meio por serem naturalmente fechadas – ou seja, o ar externo não precisa penetrar em seu interior – e longa vida útil.

Vamos rapidamente apresentar alguns pontos importantes de cada uma destas máquinas, mas antes é preciso se fundamentar no conceito básico de variação de velocidade de qualquer máquina de campo girante (corrente alternada). Conforme vimos no capítulo anterior, encontram-se abaixo de forma resumida os seguintes conceitos mínimos e essenciais, a partir dos quais tudo pode ser entendido:

$$P = M \cdot \omega$$

$$P = 0,1047 \cdot M \cdot \eta$$

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_w$$

$$\Phi = k \left(\frac{V}{f} \right)$$

$$M_{max} = k \left(\frac{V}{f} \right)^2$$

$$\eta_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Em que:

η_s – velocidade síncrona;

f – frequência nominal;

p – número de pares de polos do motor

Para 60 Hz, temos:

$\eta_s = 3.600 \text{ rpm} \rightarrow p = 1 \text{ par de polos};$

$\eta_s = 1.800 \text{ rpm} \rightarrow p = 2 \text{ pares de polos};$

$\eta_s = 1.200 \text{ rpm} \rightarrow p = 3 \text{ pares de polos};$

$\eta_s = 900 \text{ rpm} \rightarrow p = 4 \text{ pares de polos};$

Correspondentemente para 50 Hz, as velocidades são: 3.000 rpm; 1.500 rpm; 1.000 rpm e 500 rpm.

3.1 – Frequência constante

Neste caso, a velocidade do campo girante é constante. O fluxo interno da máquina passa a ser dependente somente da tensão, pois é proporcional à relação V/f . Ao se abaixar a tensão, o fluxo é reduzido, o torque máximo diminui ao quadrado e o torque do motor também fica menor: se não conseguir arrastar a carga, o rotor fica para trás e a velocidade é reduzida. Se isso for dominado, tem-se um controle de velocidade.

3.1.1 – Controle pela tensão do estator

O controle do ângulo de disparo nos tiristores faz a variação da tensão do estator. Para que o conjugado motor, necessário para a carga, seja alcançado, há a necessidade de aumentar a corrente rotórica. Isto é conseguido com o aumento da tensão rotórica, e, portanto, do escorregamento, o que varia a velocidade da máquina (figura 3.2).

Figura 3.2 – Controle da velocidade pela tensão do estator

Ao se diminuir a tensão, o torque máximo é reduzido com o quadrado da tensão. Então, o escorregamento aumenta e a velocidade do motor é alterada. Para motores categoria D, a variação é maior, disponibilizando mais variação de velocidade. Por outro lado, com o aumento do escorregamento, as perdas também sobem. Devido a isto, estas aplicações ficam limitadas a cargas que partem e param, ou seja, de funcionamentos intermitentes.

Vantagens e desvantagens

- Simplicidade na instalação e na montagem;
- Baixa faixa de variação de velocidade;
- Redução de torque;
- Redução da corrente de partida.

Aplicação

- Dispositivos de baixa inércia, devido à redução do torque;
- Não se justifica em projetos mais novos.

Atualmente, estes motores estão em desuso e são mais encontradas em aplicações antigas e carentes de substituição: a necessidade de economizar a energia das perdas já é um bom motivo para a substituição por técnicas mais modernas, sem falar na melhoria da qualidade do processo em razão de um controle melhor.

As aplicações dessa técnica não evoluíram para variação de velocidade, mas sim para sistemas de partida suave, com evoluídas e modernas chaves estáticas de partida. Neste campo, essa técnica foi responsável por uma grande modernização na automação. Também recebeu grande evolução e desenvolvimento para o controle da temperatura na alimentação de resistências de aquecimento.

3.1.2 – Controle pela tensão do rotor: resistência rotórica

No controle anterior, o melhor motor é o de categoria D. Ele tem alta resistência rotórica, cujo objetivo é absorver as perdas do escorregamento. Quanto maior é a resistência rotórica, maiores são o escorregamento e as perdas. Para controlar estas perdas rotóricas, criou-se o motor de anéis, em que se pode colocar no rotor, por meio dos anéis, a resistência desejada. Desta forma, é possível controlar o escorregamento da máquina e a quantidade de energia rotórica, que se vai dissipar nessas resistências, controlando a velocidade do sistema.

Houve um aprimoramento da tecnologia anterior. As perdas rotóricas foram direcionadas para uma resistência rotórica, o que garantiu ao motor mais torque para acionamento da carga, além do aumento de controle sobre a velocidade. E as perdas foram colocadas para fora do motor em sua resistência rotórica externa. Trata-se de um circuito no rotor do motor, com uma ponte retificadora de tiristores, que controla o valor da resistência rotórica por meio de modulação, adaptando-a para a obtenção da velocidade desejada. Há modulação sobre uma resistência fixa, visando tornar a resistência variável conforme a velocidade de operação.

O controle do ângulo de disparo dos tiristores faz a variação da tensão do rotor e, conseqüentemente, da resistência rotórica. Conforme a resistência, tem-se escorregamento e velocidade. Para que o conjugado motor, necessário para a carga, seja alcançado, há a necessidade de aumentar a corrente rotórica. Isto é conseguido com o aumento da tensão rotórica, e, portanto, do

escorregamento, o que varia a velocidade da máquina. Todas as perdas vão para o meio externo na resistência rotórica (figura 3.3).

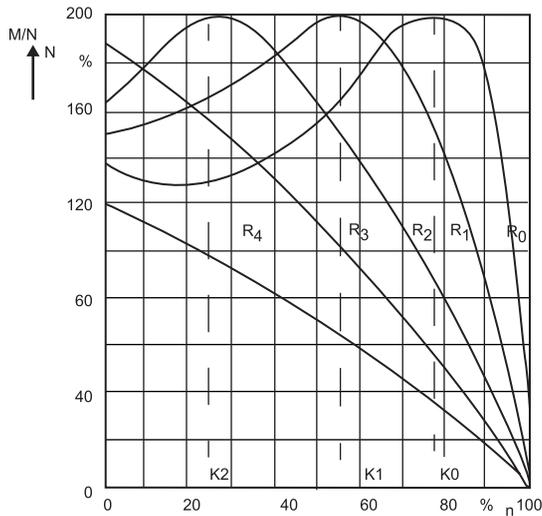


Figura 3.3 – Controle da velocidade pela resistência rotórica

Por outro lado, aumentando-se o escorregamento, as perdas também sobem. Devido a isto, as perdas são tão maiores quanto menores forem as velocidades.

Vantagens e desvantagens

- Máquina de indução de anéis;
- Alto torque de partida;
- Altas perdas do circuito rotórico;
- Sobredimensionamento do motor e instalação de sistema de ventilação forçada independentemente.

Aplicação

Dispositivos de alta inércia, devido ao alto torque resultante pela relação V/f nominais;

Não se justifica em projetos novos, principalmente pelo uso dos motores de anéis.

Esta técnica também está em desuso.

3.1.3 – Controle pela tensão do rotor: cascata subsíncrona

Trata-se do mesmo controle anterior, sendo que em vez de dissipar a energia rotórica em perdas em uma resistência variável modulada, estas perdas são devolvidas para a rede via ponte retificadora de tiristores. Desta forma, procura-se economizar as energias das perdas (figura 3.4).

O controle do ângulo de disparo dos tiristores faz a variação da tensão do rotor, promovendo uma contratensão rotórica e, conseqüentemente, a mudança na velocidade. Conforme a contratensão rotórica, tem-se escorregamento e velocidade. Para que o conjugado motor, necessário para a carga, seja alcançado, há a necessidade de aumentar a corrente rotórica. Isto é conseguido com o aumento da tensão rotórica, e, portanto, do escorregamento, o que varia a velocidade da máquina. Todas as perdas vão de volta para a rede de alimentação.

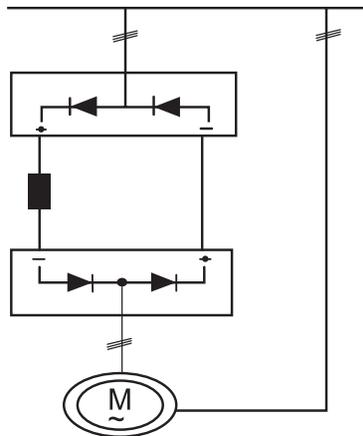


Figura 3.4 – Cascata subsíncrona

Vantagens e desvantagens

- Máquina de indução de anéis;
- Alto torque de partida;
- Altas perdas do circuito rotórico devolvidas para a rede de alimentação;
- Sobredimensionamento do motor e/ou instalação de sistema de ventilação forçada independentemente.

Aplicação

Dispositivos de alta inércia, devido ao alto torque resultante pela relação V/f nominais;

Não se justifica em projetos novos, principalmente pelo uso dos motores de anéis.

Esta também é uma técnica em desuso.

Como vimos, todas as alternativas de solucionar a variação de velocidade via frequência constante resultaram em perdas e máquinas especiais. Atualmente, soluções mais modernas substituem estas aplicações, tornando inviável o desenvolvimento de qualquer um destes sistemas para novos projetos – além disso, os que ainda existem em operações podem ser substituídos. Conforme o caso, os motores de anéis podem ser curto-circuitados, tornando-se motores de gaiola, aplicáveis em controles de velocidade mais modernos.

3.2 – Frequência variável

Neste caso, a velocidade do campo girante é variável e a velocidade da máquina é variável. O fluxo interno da máquina é dependente da relação V/f . Se a velocidade do campo girante é variável, ao se abaixar a frequência, a tensão baixa correspondentemente na relação V/f , o fluxo se mantém constante, o torque do motor e o torque máximo se mantêm constantes. Trabalha-se neste caso na área de campo constante. Se a frequência aumenta, mas a tensão for mantida constante, o fluxo é reduzido inversamente com a frequência, o torque é reduzido e o torque máximo é reduzido com o inverso da frequência ao quadrado. Trabalha-se neste caso na área de enfraquecimento de campo. Para todos os casos, para se conseguir formar a frequência variável, a tensão alternada da rede é retificada em tensão contínua, para depois ser invertida em tensão alternada, com frequência variável. Esse processo contém um circuito intermediário, que pode ser de tensão ou de corrente.

Esse conjunto é chamado de conversor de frequência e é composto de três partes, o retificador, o circuito intermediário e o inversor. Embora no mercado muitos profissionais chamem a esse conjunto de inversor de frequência, o nome correto é conversor de frequência, pois inversor de frequência

se refere somente a parte inversora, que alimenta o motor a partir do circuito intermediário (figura 3.5).

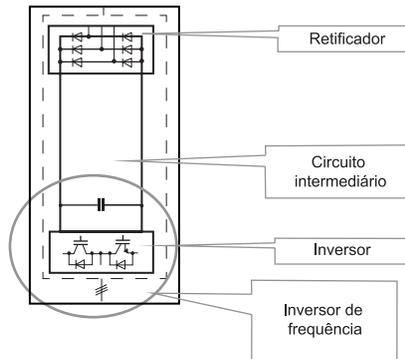


Figura 3.5 – Conversor de frequência com circuito intermediário

3.2.1 – Controle direto – conversor direto – ciclo conversor

Essa é a única tecnologia em que não há circuito intermediário e a formação da frequência variável acontece diretamente pela retificação da rede. A partir de um sistema de três circuitos trifásicos, dos três secundários do transformador, com tensão e frequência fixas, forma-se um circuito trifásico de tensão e frequência variáveis. Cada uma das pontes retificadoras trabalha com ângulo de disparo dos tiristores abaixo de 90° e em inversão, com ângulo de disparo maior que 90° , permitindo que as partes positivas e as partes negativas da onda senoidal sejam feitas, alimentando o motor.

A frequência de saída é de no máximo 50% da frequência de entrada da rede de alimentação. Quanto menor for, melhor fica a forma senoidal da tensão e da corrente, fazendo um movimento homogêneo e concêntrico do campo girante. Este sistema é próprio para operação em velocidades baixas – e extremamente baixas – pela possibilidade de criar a melhor forma da senoide quanto menor for a frequência de alimentação do motor.

Vantagens e desvantagens

- Operação quatro quadrantes sem adicionais;
- Velocidade de operação baixa e extremamente baixa;
- Máxima velocidade de 50% para a frequência da rede de alimentação.

Aplicação

Esta técnica é direcionada para altas potências e baixas velocidades operacionais, como laminação, mineração e fornos rotativos (por exemplo, de cimento). As aplicações são feitas em média tensão e alta potência para motores síncronos ou assíncronos.

Pelos custos envolvidos, torna-se viável para aplicações de alta potência e baixa velocidade de operação, com boa dinâmica de regulação e operação em quatro quadrantes, o que lhe permite enviar energia da rede de alimentação para a máquina (como motor) e receber energia da máquina para a rede de alimentação (como gerador). Esta operação está intrínseca na tecnologia na máquina sem necessidade de nada adicional.

Por se tratar de aplicações e de conversores de frequência bastante específicos, não vamos entrar em mais detalhes.

3.2.2 – Controle indireto, com circuito intermediário de tensão variável

Esta tecnologia, em que há formação de um circuito intermediário com tensão variável, foi muito utilizada até os finais da década de 1990. Nesta época, os transistores de potência não estavam tão desenvolvidos e a parte inversora era realizada com os semicondutores de maior credibilidade e confiança da época, ou seja, os tiristores.

3.2.2.1 – Conversores com circuito intermediário de corrente

Dentre estes conversores com circuito intermediário variável, encontram-se aqueles que possuem circuito intermediário de corrente, que apresentou vasta aplicação em centrífugas de açúcar. Aliás, muitos equipamentos com este tipo de tecnologia ainda se encontram operando nas usinas de açúcar e álcool. No mercado, este tipo de conversor é muito conhecido com o nome de CSI, originado do inglês, *Current Source Inverter*.

Com a regulação da corrente do circuito intermediário, realizada na ponte retificadora controlada de tiristores na entrada, faz-se a imposição da corrente de magnetização e de carga. Conforme o ângulo de disparo dos

tiristores há um fator de potência na rede de alimentação. Este regulador de corrente controla a corrente total, ou seja, a corrente aparente do motor, onde estão a corrente ativa e a reativa. A saída do regulador de frequência, ou regulador de velocidade, é a corrente ativa desejada para a formação do torque (figura 3.6).

A corrente aparente desejada é formada por um bloco formador de corrente aparente, que define qual deve ser regulada a partir da corrente ativa desejada e da reativa, que produz fluxo. Lembre-se das fórmulas correspondentes a estas correntes, vistas no capítulo dois, que são utilizadas em toda a malha de regulação do conversor.

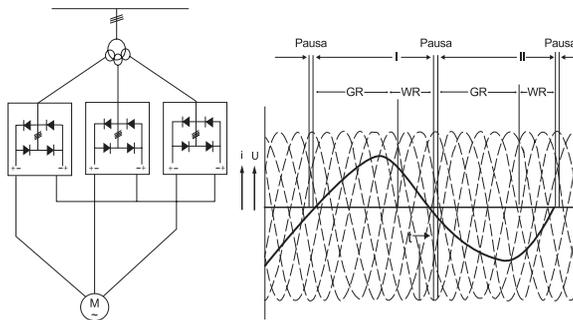


Figura 3.6 – Conversor de frequência com controle direto

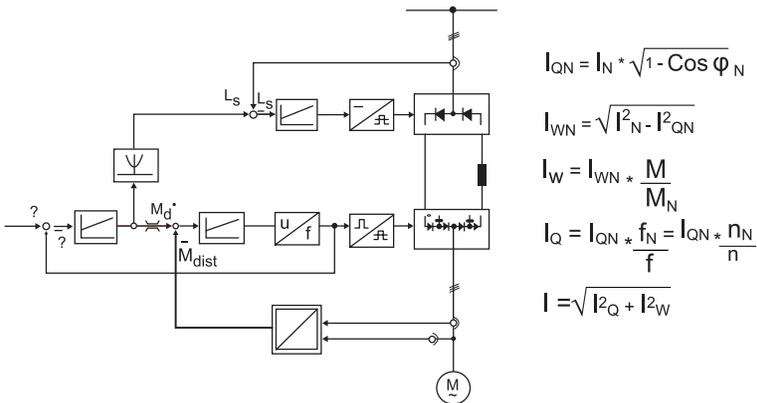


Figura 3.7 – Conversor de frequência com circuito intermediário de corrente

A frequência é controlada na parte inversora. Para a formação da onda de alimentação da máquina com a frequência e a velocidade desejadas, a corrente é comutada a cada 180°, formando uma corrente não senoidal na alimentação do motor.

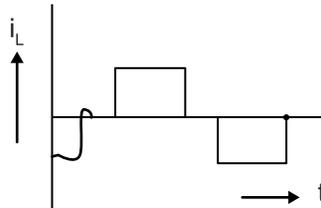


Figura 3.8 – Forma de onda da corrente

Esta corrente não senoidal, em bloco completo, gera como consequência um campo girante, que comuta de posição a cada 60°, produzindo uma velocidade não homogênea e não concêntrica, com trancos correspondentes ao grau de comutação.

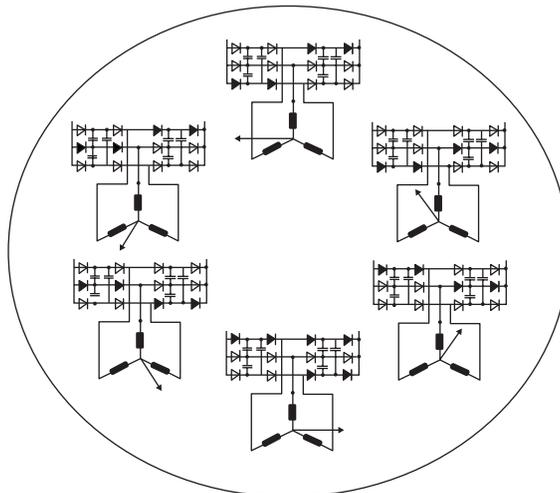


Figura 3.9 – Conversor de frequência com circuito intermediário variável

Em velocidades abaixo de 10% da nominal, esses trancos são perceptíveis, impossibilitando o trabalho. Já em velocidades maiores, a inércia da máquina e da mecânica da carga aliviam esses trancos, possibilitando a operação com homogeneidade aceitável.

Para a comutação dos tiristores, mesmo em corrente contínua, é colocado um capacitor, que forma um sistema de bloqueio dos tiristores, um par “casado” com a indutância do motor, provocando que a comutação seja dependente da carga. Assim sendo, o inversor fica “casado” com o respectivo motor, sendo aplicado em operações monomotor.

A indutância no circuito intermediário tem a função de limitar a corrente, provocada pelos diferentes valores das tensões instantâneas do retificador da rede e da inversora da carga. Ela é dimensionada para que não haja corrente intermitente no circuito intermediário mesmo com o motor a vazio.

Mesmo utilizando uma ponte trifásica simples de tiristores e tendo a corrente em um único sentido no retificador, pode acontecer a devolução de energia para a rede de alimentação, com a inversão da tensão, em operações em ângulos maiores que 90° – ou seja, em quatro quadrantes, sem adicionais.

Vantagens e desvantagens

- Operação quatro quadrantes sem adicionais;
- Velocidades de operação acima de 10% da nominal;
- Acionamento monomotor;
- Aplicação para motores assíncronos;
- Fator de potência variável conforme as condições operacionais da carga.

Aplicação

Técnica direcionada para velocidades de operação acima de 10% da nominal. Maior aplicação para centrífugas, principalmente de açúcar, bombas e ventiladores, além de processos que exigem frenagem.

Esta técnica também está em desuso.

3.2.2.2 – Conversores com circuito intermediário de tensão variável

Além dos conversores de circuito intermediário de corrente, pelos mesmos motivos de carência em semicondutores comutáveis e controláveis, criou-se a tecnologia de circuito intermediário de tensão variável. Seguindo os preceitos da relação V/f , este conversor varia a tensão por meio de uma ponte retificadora controlada de tiristores na entrada e a parte inversora varia a frequência, formando assim dois controles separados (figura 3.10).

Para cada frequência desejada para uma operação, conforme a relação V/f , há uma tensão correspondente. Ela é controlada com um regulador por meio do retificador controlado de tiristores na entrada. Uma medição de corrente juntamente com o regulador compensa perdas de tensão no circuito para garantir a sua formação no estator da máquina sob quaisquer condições de carga.

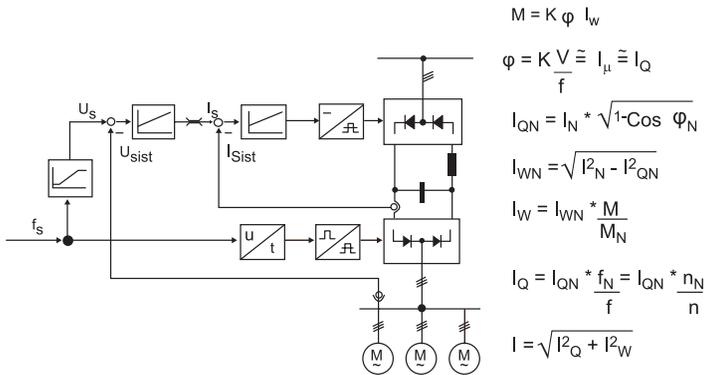


Figura 3.10 – Conversor de frequência com circuito intermediário variável

Na parte inversora, a frequência é controlada. Para a formação da onda de alimentação da máquina com a frequência e a velocidade desejadas, a tensão é comutada a cada 180° , formando uma tensão em bloco completo não senoidal na alimentação do motor. A amplitude do bloco corresponde à tensão do circuito intermediário. Em função dessa amplitude, define-se a tensão eficaz.

Essa tensão não senoidal em bloco completo gera como consequência um campo girante que comuta de posição a cada 60° , produzindo uma velocidade não homogênea e não concêntrica, com trancos correspondentes a este grau de comutação. Cada fase comuta defasada uma da outra a cada 120° (figura 3.11).

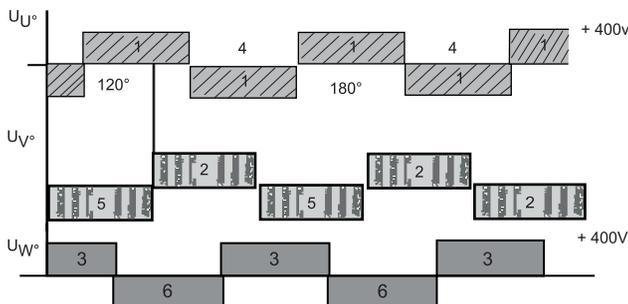


Figura 3.11 – Sistema trifásico – bloco completo

Para velocidades abaixo de 10% da nominal, esses trancos são perceptíveis, impossibilitando a operação. Para velocidades maiores, a inércia da máquina e da mecânica da carga aliviam esses trancos, possibilitando a operação com homogeneidade aceitável. Sendo uma ponte trifásica simples de tiristores, o retificador não conduz corrente em sentido contrário, não permitindo, portanto, devolução de energia para a rede de alimentação. Isto é, não realiza a operação em quatro quadrantes, sem adicionais.

Vantagens e desvantagens

- Operação quatro quadrantes somente com adicionais;
- Velocidades de operação acima de 10% da nominal;
- Acionamento mono e multimotor;
- Aplicação para motores síncronos e assíncronos;
- Fator de potência variável conforme as condições operacionais da carga.

Aplicação

Técnica direcionada para velocidades de operação acima de 10% da nominal. Maior aplicação para máquinas têxteis com multimotores e altas frequências de operação.

3.2.2.3 – Conversores autocomutados – conversores com circuito intermediário de corrente para máquinas síncronas

Esses conversores são amplamente aplicados em casos em que se opta pelo uso de motores síncronos. Possuem circuito intermediário de corrente. O retificador e a parte inversora são compostos por simples pontes retificadoras controladas por tiristores (figura 3.12). A ponte retificadora de entrada tem os ângulos de disparo controlados pela sequência da rede de alimentação. A de saída, parte inversora, tem os ângulos de disparo controlados pela sequência da força contraeletromotriz gerada pela máquina síncrona.

Pela regulação da corrente do circuito intermediário, realizada na ponte retificadora controlada de tiristores na entrada, faz-se a imposição da corrente de magnetização e de carga. Há um fator de potência na rede de alimentação para esse controle conforme o ângulo de disparo dos tiristores. A energia reativa necessária para comutação é fornecida pela própria máquina.

Para velocidades abaixo de 10% da velocidade podem ocorrer oscilações e vibrações por causa da corrente intermitente de procura da posição do rotor. A indutância no circuito intermediário tem a função de limitar a corrente provocada pelas diferentes valores das tensões instantâneas, do retificador da rede e da inversora da carga. É dimensionada para que não exista corrente intermitente no circuito intermediário, mesmo com o motor a vazio.

Mesmo utilizando uma ponte trifásica simples de tiristores no retificador e com a corrente no retificador em um único sentido, pode-se fazer a devolução de energia para a rede de alimentação com a inversão da tensão, com operação em ângulos maiores que 90° , ou seja, operação em quatro quadrantes sem adicionais.

Vantagens e desvantagens

- Construção simples da parte de potência, usando somente tiristores;
- Operação quatro quadrantes sem adicionais;
- Velocidades de operação acima de 10% da nominal;
- É necessário uma meio auxiliar de partida;
- Acionamento monomotor;
- Aplicação para motores síncronos;
- Fator de potência variável conforme as condições operacionais da carga.

Aplicação

Técnica direcionada para velocidades de operação acima de 10% da nominal. Maior aplicação para altas potências, MW, com máquinas síncronas, como exaustores de fornos siderúrgicos, bombas em geral, ventiladores e processos que exigem frenagem.

3.2.3 – Controle indireto, com circuito intermediário de tensão constante

A tecnologia de formação de um circuito intermediário com tensão variável, que vimos anteriormente, foi muito utilizada até os finais da década de 1990, quando os transistores de potência não estavam tão desenvolvidos.

CIRCUITO INTERMEDIÁRIO DE INVERSORES PWM

Como já vimos anteriormente, a configuração mais simples do conversor de frequência PWM se apresenta da seguinte forma (figura 4.1).

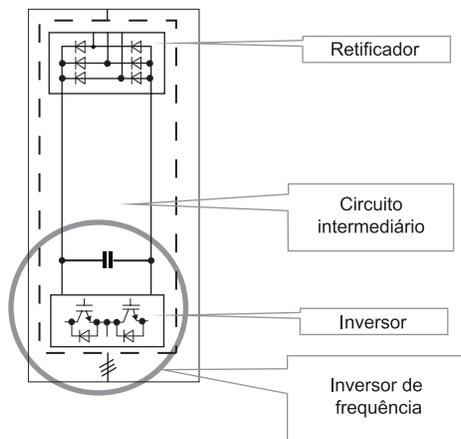


Figura 4.1 – Circuito intermediário de conversor de frequência PWM

O retificador é formado de uma ponte de diodos, pois a tensão retificada, que forma o circuito intermediário, fica constante. O circuito intermediário constante contém um banco de capacitores para alisar as oscilações da tensão retificada e, ao mesmo tempo, tem capacidade de reativo suficiente para alimentar a energia reativa da máquina síncrona ou assíncrona, motor ou servomotor. O inversor é formado de modernos transistores de potência IGBT.

4.1 – Configurações do circuito intermediário

Desde que mantenha a tensão contínua constante, o circuito intermediário pode ser alimentado por qualquer fonte: ponte retificadora, banco de baterias, gerador de corrente contínua, célula solar, gerador eólico etc. (figura 4.2).

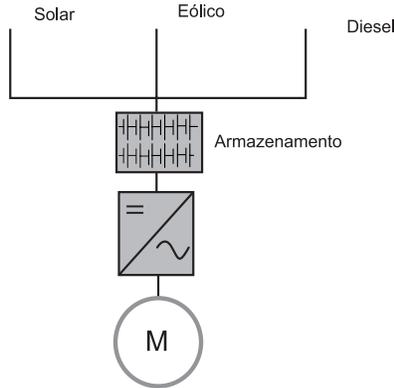


Figura 4.2 – Exemplos de possibilidades de alimentação do circuito intermediário

Dentre os vários sistemas possíveis, o mais utilizado é a ponte retificadora, que transforma a tensão senoidal, com tensão e frequência fixas, em uma tensão contínua constante. Pode ser monofásica ou trifásica, de diodos, tiristores ou transistores.

O circuito intermediário pode alimentar somente um inversor ou vários inversores, formando um barramento em tensão contínua (figura 4.3), que costumeiramente é citado meio industrial com o termo inglês *link DC*.

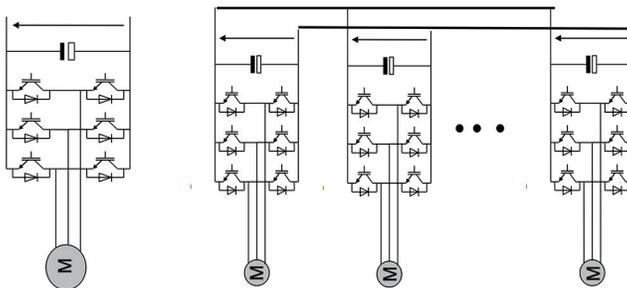


Figura 4.3 – Barramento de tensão do circuito intermediário

Alimentado pelo circuito intermediário, o banco de capacitores fica no inversor, que tem capacidade para alimentar determinada potência reativa indutiva conforme a capacidade de motor. Agora vamos analisar o circuito intermediário originado pela ponte retificadora trifásica de diodos, que é a formação mais utilizada nos inversores, principalmente os de mais baixa potência. Tudo o que for analisado para este caso, com as devidas considerações, é válido para os demais.

O circuito intermediário tem sua tensão contínua retificada a partir da tensão senoidal da rede, que tem frequência e tensão fixas. Um banco de capacitores tem também a função de alisar as oscilações (*ripples*) originadas da retificação (figura 4.4).

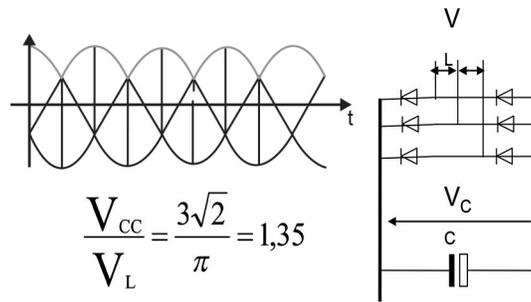


Figura 4.4 – Tensão contínua retificada – circuito intermediário

No caso de se ter um circuito de retificação por meio da ponte trifásica de diodos, o ângulo de comutação de uma fase para a outra é zero graus e o fator de potência é 1, ou seja, a rede alimenta o sistema fornecendo somente a potência ativa. Em máquina, motor ou servomotor, porém, operar necessita de uma potência reativa indutiva, que é fornecida pelo banco de capacitores.

Para que aconteça a conexão entre o circuito intermediário e o inversor, o capacitor deste último deve estar descarregado. Portanto, a conexão direta da tensão V_{cc} no banco de capacitores provoca uma corrente equivalente à de curto-circuito em seu carregamento. Para evitar isso, utiliza-se um sistema de pré-carga, que varia de acordo com a potência do inversor. Os mais simples usam apenas contator e resistência de pré-carga; os de maiores potências, uma composição de resistor de pré-carga e ponte de diodos. A figura 4.5 mostra exemplos desses dois sistemas.

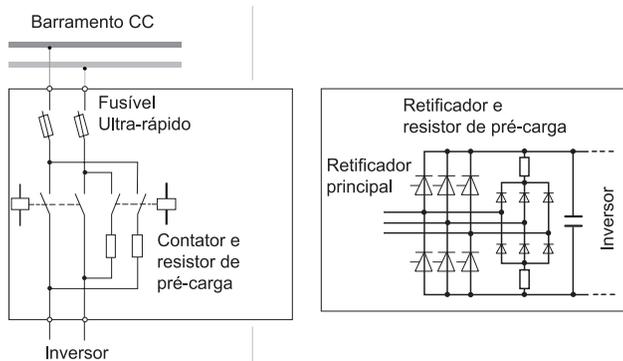


Figura 4.5 – Exemplos de sistemas de pré-carga

Em ambos os casos, a pré-carga se encontra instalada no circuito intermediário. No entanto, existem situações em que ela se localiza fora do circuito intermediário e antes da ponte retificadora principal: quando isto acontece, é feita para todo o barramento CC e não individualmente para cada inversor. A pré-carga pode ser feita por meio de um processo mais sofisticado, com controle dos pulsos em uma ponte de tiristores, ou por um processo simples de contator e resistor, alimentando a ponte retificadora principal. No exemplo da figura 4.6, a ponte retificadora principal pode ser com tiristores, diodos ou transistores. Quando tratarmos dos retificadores e da rede de alimentação, vamos entrar mais em detalhes nestes casos.

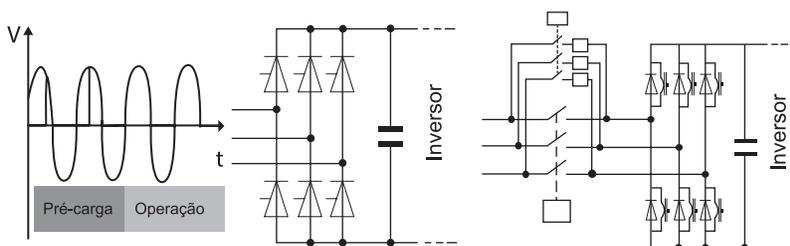


Figura 4.6 – Exemplos de ponte retificadora principal

Para os casos em que se tem a necessidade de se utilizar vários inversores, conectados em um único barramento do circuito intermediário, deve-se considerar a seguinte situação:

- **Todos os inversores pertencem aos acionamentos considerados principais:** trata-se de uma aplicação que contém vários acionamentos e todos são principais, ou seja, o sistema não opera se um

deles parar. Neste caso, o retificador controla a pré-carga do circuito intermediário, carregando os capacitores de todos os inversores. Se por algum motivo um inversor parar, todo o sistema interrompe o funcionamento.

- **Alguns inversores pertencem aos acionamentos considerados secundários:** trata-se de uma aplicação que contém vários acionamentos (figura 4.7) e alguns deles, tidos como secundários, podem parar sem que o sistema deixe de operar. Neste caso, desconectando-se esse inversor do barramento do circuito intermediário, para conectá-lo novamente, com todo o sistema operando, há a necessidade de instalar um circuito de pré-carga para este inversor, pois o barramento CC vai estar alimentado com toda a sua tensão nominal.

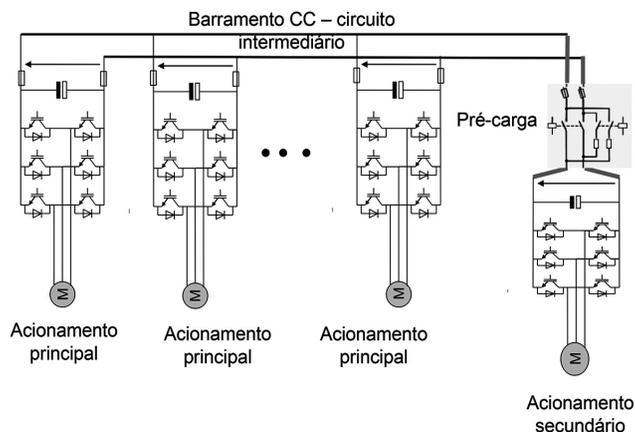


Figura 4.7 – Acionamentos principal e secundário

Conclusão: Os inversores dos acionamentos principais não necessitam de circuito de pré-carga individual, pois a pré-carga geral do barramento CC atende a todos eles. No entanto, como os inversores dos acionamentos secundários podem ser conectados ou desconectados individualmente do barramento CC, necessitam de pré-carga individual para cada inversor. Nestes casos, a mais utilizada é a pré-carga com contator e resistor.

Em casos de vários inversores em um mesmo barramento CC de circuito intermediário, é importante que todos eles sejam conectados ao barramento por meio de fusíveis ultrarrápidos. Em uma eventual falha de algum inversor, o fusível o separa dos demais. Os transistores não são protegidos pelos

fusíveis, e sim protegem a si próprios: os inversores possuem um circuito extremamente rápido e preciso que atua na base dos transistores, fazendo o comando de abertura quando a corrente atinge valores considerados a níveis de curto-circuito. Mas, se este sistema falhar, somente o fusível ultrarrápido poderá garantir que tudo não se torne pior, abrindo a falha. Normalmente, em situações assim, o transistor do sistema já se encontra danificado. Em relação à sobrecarga, os inversores fazem a proteção por um relé térmico, que se encontra em seu próprio controle.

Quando há um único inversor conectado a um circuito intermediário alimentado por um retificador com potência compatível, a presença de um fusível ultrarrápido na alimentação do retificador já é suficiente para garantir a proteção do circuito intermediário, não sendo necessário instalar outro específico para ele, e também do inversor.

4.2 – Operação quatro quadrantes – frenagem

De acordo com a sua configuração, o inversor pode permitir que a máquina, motor ou servomotor, possa fazer torque em um sentido ou no contrário, isto é, arrastando ou freando a carga. A velocidade também pode acontecer em qualquer um dos dois sentidos. Como sabemos, a potência é definida pela equação:

$$P \cong K \cdot M \cdot \eta$$

Por este motivo, também podemos ter potência em um sentido ou no contrário. No sentido positivo, potência pode ser convencionalizada como a que o acionamento consome da rede de alimentação e, no sentido negativo, que o acionamento devolve para a rede de alimentação. Neste caso, a alimentação do inversor vem do circuito intermediário, ou seja, potência positiva é a que o circuito intermediário fornece para o inversor e potência negativa é a que o circuito intermediário recebe do inversor.

Existem vários exemplos de cargas que operam em quatro quadrantes, realizando torque e velocidade – portanto, também a potência – em ambos os sentidos. Vamos adotar o exemplo da figura 4.8, de uma carga tipo guindaste, que torna bastante evidente o que está sendo apresentado. Vale ressaltar que isto vale para qualquer carga que opere desta forma.

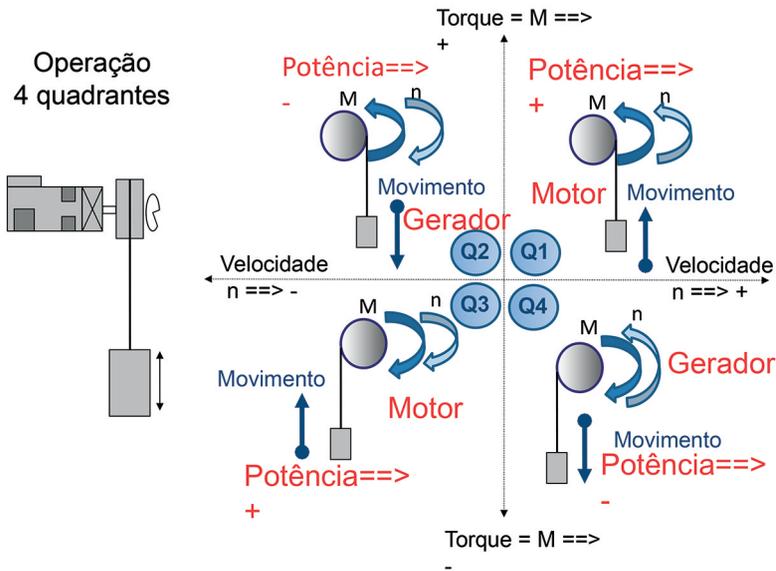


Figura 4.8 – Exemplo de operação quatro quadrantes

Na operação de quatro quadrantes, temos:

Quadrante 1 torque $M +$; velocidade $N +$ potência $+$ operação como motor energia flui da rede de alimentação para a carga máquina arrasta a carga.

Quadrante 2 torque $M +$; velocidade $N -$ potência $-$ operação como gerador energia flui da carga para rede de alimentação máquina é arrastada pela carga.

Quadrante 3 torque $M -$; velocidade $N -$ potência $+$ operação como motor energia flui da rede de alimentação para a carga máquina arrasta a carga.

Quadrante 4 torque $M -$; velocidade $N +$ potência $-$ operação como gerador energia flui da carga para rede de alimentação máquina é arrastada pela carga.

Na operação como gerador, a máquina é arrastada pela carga, efetua o processo de frenagem e fornece energia para a rede de alimentação, que no caso é o circuito intermediário. Ao recebê-la, o banco de capacitores deve enviar a energia para algum lugar: se ela fica acumulada, a tensão sobe e chega a um limite, obrigando alguma proteção a atuar para evitar danos. Quando

isto acontece, há um bloqueio no recebimento da energia de frenagem e o sistema todo desarma, ou seja, o acionamento para de funcionar.

Para enviar a energia recebida pela frenagem para algum lugar tem-se duas opções: a) direcioná-la para a rede de alimentação via um retificador regenerativo. Esta é a melhor opção, pois há economia de energia quando ela é recuperada no sistema elétrico da indústria (mais adiante, vamos trabalhar esse tema na hora de detalhar os retificadores e a rede de alimentação). b) queimar controladamente a energia de frenagem gerada em um banco de resistências. Esta opção deve ser considerada para frenagens ocasionais, que não envolvem grandes quantidades de energia, de tal forma que sua perda possa ser considerada desprezível. Deve-se levar em consideração o lugar onde as resistências vão ficar, pois o ambiente ficará aquecido. Esse é o assunto que vamos tratar agora.

Para isso, é preciso analisar o comportamento da velocidade, do torque e da potência no processo do guindaste mencionado anteriormente. O comportamento da carga pode ter a velocidade definida da seguinte forma: sai do zero, acelera até alcançar a velocidade de avanço no sentido de subida; quando chega a certo ponto, desacelera até frear completamente; fica um tempo parado e acelera na descida até chegar à velocidade de retrocesso, descendo e atingindo um ponto em que diminui a velocidade até parar. Essa é a descrição do comportamento esquematizado na figura 4.9.

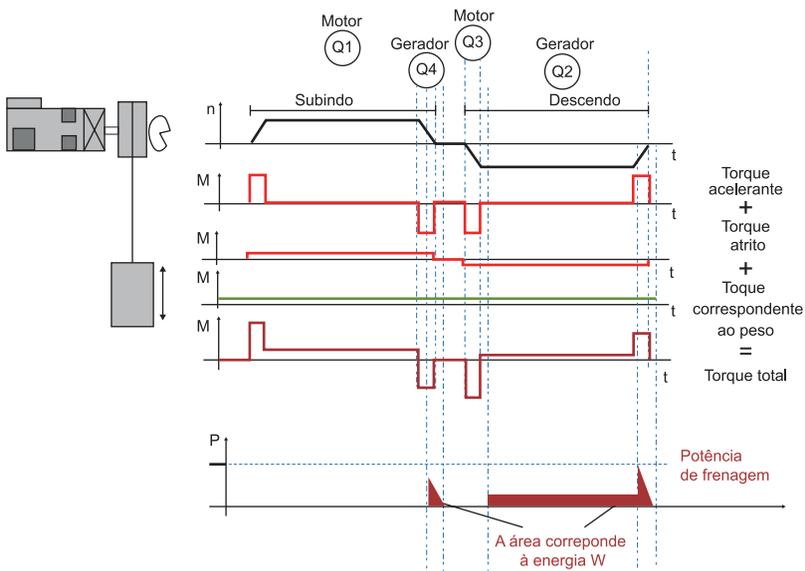


Figura 4.9 – Exemplo de ocorrência de potência de frenagem

O torque total a ser realizado pela máquina, motor ou servomotor, é formado por todos os que acontecem ao longo do processo: torque acelerante ou desacelerante, de atrito, correspondente ao peso, que se encontra no guindaste. O torque acelerante ou desacelerante ocorre quando há variação de velocidade. O torque de atrito é uma resistência adicional ao peso na elevação, mas em descida ajuda a segurar o peso, diminuindo o torque que o motor deve fazer para contê-lo. Normalmente nesses casos, há certo contrapeso, favorecendo a existência de um torque mínimo.

Como sabemos, a potência vale: $P = K.M.\eta$

A potência negativa de frenagem, que acontece quando o motor opera como gerador, existe nas operações nos quadrantes dois e quatro. É o resultado do produto de torques e velocidades em sentidos opostos, ou seja, um sendo positivo e outro negativo. Retorna ao circuito intermediário e, ali chegando, aumenta a tensão do banco de capacitores. Deve ser dissipada em um banco de resistores.

Este banco de resistores necessita ter um controle, que mede a tensão do circuito intermediário: quando ela sobe e chega a um determinado valor, dispara a base do transistor, que descarrega a energia da frenagem no banco de resistência. Com isso, a tensão baixa e, ao alcançar certo montante, o transistor desliga a resistência. A resistência entra então em processo de resfriamento.

Os pontos C e D são os pontos a serem conectados no circuito intermediário. Esta conexão deve ser feita usando fusíveis ultrarrápidos, pois se houver qualquer problema no circuito, ele será isolado do banco de capacitores. Os transistores fazem a proteção de curto-circuito e de sobrecorrente no banco de resistência, mas em caso de falha no próprio transistor, o fusível garantirá a proteção do sistema. A energia de frenagem é dissipada na resistência em processo intermitente. A resistência esquenta e esfria durante o processo (figura 4.10).

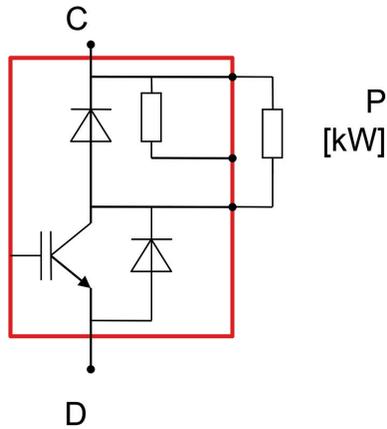


Figura 4.10 – Módulo de controle da resistência de frenagem

Enquanto houver energia de frenagem, ela vai aumentar a tensão do circuito intermediário. Ao chegar a um determinado valor, dispara a base do transistor, que descarrega a energia de frenagem no banco de resistências. Como já vimos, este processo é feito em modulação PWM (figura 4.11).

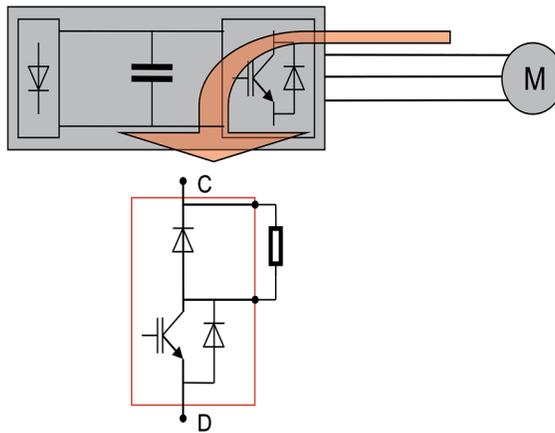


Figura 4.11 – Energia de frenagem descarregada na resistência de frenagem

Os transistores são controlados em processo de modulação PWM. Inicialmente, com a resistência fria, descarrega mais energia de frenagem, com uma largura de pulsos maior. À medida que a resistência esquenta, a largura dos pulsos diminui e a resistência dissipa menos energia. A carga, porém,

também está em menor velocidade, logo há menos energia para ser frenada (figura 4.12).

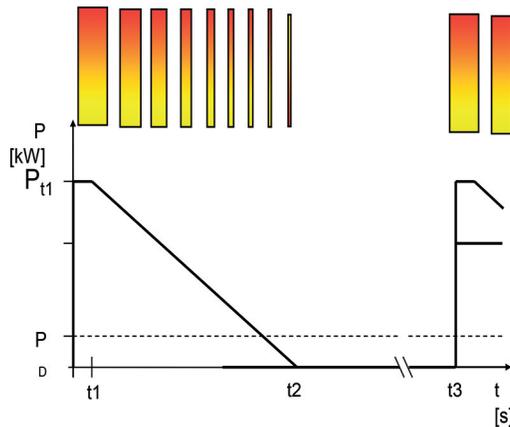


Figura 4.12 – Modulação PWM – controle da resistência de frenagem

O processo deve ser muito bem dimensionado: a resistência não deve chegar ao seu limite de capacidade de dissipação enquanto ainda houver energia para ser frenada e dissipada. Se isso ocorrer, a frenagem é interrompida e o inversor desarma por sobretensão no circuito intermediário, o que significa que a resistência não conseguiu dissipá-la completamente.

A capacidade de dissipação da resistência é grande em um tempo t_1 muito curto: três segundos, por exemplo. Mas diminui à medida que o tempo aumenta até chegar a um tempo t_2 (30 segundos, por exemplo) em que ficará esgotada. Neste momento, é preciso esperar até um tempo t_3 (90 segundos, por exemplo) para que a resistência possa esfriar e o processo de frenagem esteja habilitado para recomeçar. Todo este controle é feito por um módulo de controle via transistor, denominado *chopper*.

Calcula-se a potência de frenagem para cada tempo em que ela ocorrer. A maior potência é escolhida entre todas as que acontecem ao longo do ciclo.

$$P_{frenagem} = M \cdot \omega$$

$$P_{frenagem} = 0,1047 \cdot M \cdot \eta$$

5

RETIFICADORES

Como vimos, a configuração mais simples do tipo de conversor de frequência PWM se apresenta da seguinte forma (figura 5.1): o retificador é formado de uma ponte de diodos, uma vez que a tensão retificada, que forma o circuito intermediário, é constante. O circuito intermediário constante contém um banco de capacitores para alisar as oscilações da tensão retificada e, ao mesmo tempo, tem capacidade de reativo suficiente para alimentar a energia reativa da máquina síncrona ou assíncrona, motor ou servomotor.

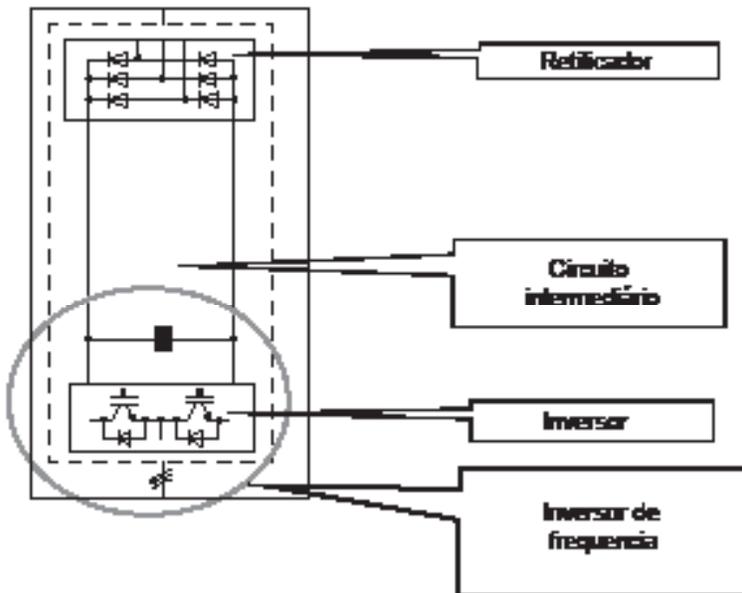


Figura 5.1 – Conversor de frequência PWM – configuração básica

São várias as configurações de retificadores, desde as mais básicas, usando diodos e tiristores, até as mais modernas, com transistores de potência. Certos retificadores transferem energia somente da rede de alimentação para a carga, enquanto outros também permitem regenerar energia no sentido inverso. É preciso citar que alguns modelos causam problemas de qualidade energética, com inserção de harmônicos na rede.

Não é o nosso intuito detalhar os retificadores em termos de projeto, pois existem vários livros, apostilas e cursos que dão muitas informações sobre eletrônica de potência dos diodos, tiristores, transistores, circuitos *snubbers*, filtros etc. Neste trabalho, o objetivo é apresentar detalhes dos retificadores para aplicações em conversores de frequência em conjunto com os circuitos intermediários e inversores de frequência.

5.1 – Retificadores básicos em ponte de diodos

Vamos iniciar o tema tratando do retificador mais básico, em ponte de diodos. Como o inversor de frequência inverte uma tensão contínua em uma alternada trifásica com frequência e tensão variáveis, o retificador pode ser monofásico ou trifásico: é possível, a partir de uma rede monofásica, alimentar um motor trifásico via inversor de frequência. Esse é um recurso bastante interessante em pequenas indústrias e sistemas agrícolas.

As tensões trifásicas da rede de alimentação, retificadas, produzem a corrente, a tensão e a potência contínuas. A potência contínua não tem componente reativo e, portanto, é ativa. A corrente contínua é originada das correntes em cada fase – apenas duas delas conduzem a corrente por vez. A fase que conduz a corrente é a que contém o diodo mais habilitado para fazer a condução: no lado positivo, é a tensão mais positiva das três; no lado negativo, é a tensão mais negativa (figura 5.2).

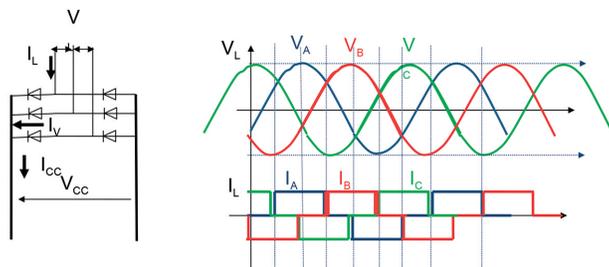


Figura 5.2 – Retificador trifásico

Embora a tensão seja senoidal, a corrente não o é. Trata-se, isso sim, de uma corrente alternada, ora positiva ora negativa, mas com forma de onda não senoidal. As equações que regem o retificador monofásico e trifásico são apresentadas de maneira resumida. Já as que regem as correntes da linha no sistema trifásico em função da corrente contínua são apresentadas na figura 5.3. Conclui-se, então, que a corrente da linha é 82% da contínua e em cada diodo, 58% da contínua.

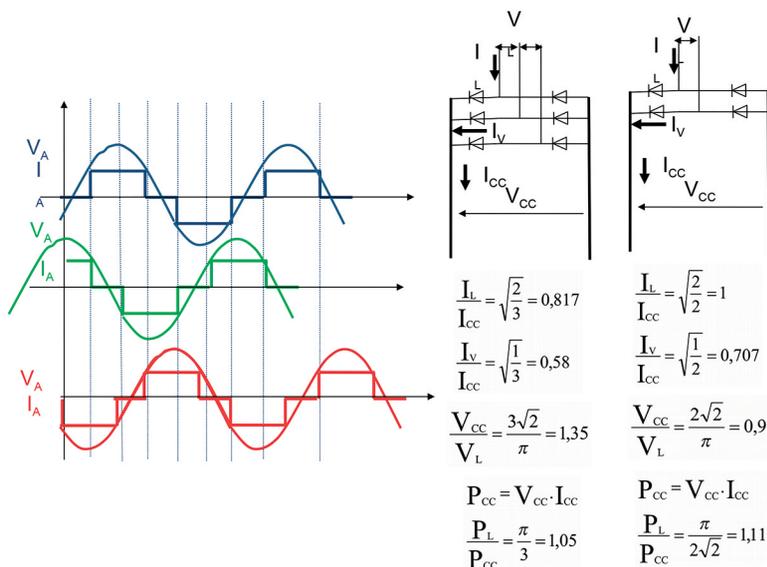


Figura 5.3 – Resumo de equacionamentos – ponte retificadora

Este equacionamento é muito importante. Tem a função de um auxiliar na definição dos componentes de linha para o circuito de alimentação do retificador.

5.1.1 – Contator de linha na alimentação do retificador

De acordo com o equacionamento anterior, observa-se que o contator trifásico da linha deverá ter corrente com capacidade de 82% da contínua da alimentação do circuito intermediário. O contator não precisa ser dimensionado pela categoria de emprego AC3, que lhe permite ter uma corrente de estabelecimento de seis vezes a nominal. Esta categoria é utilizada para

quando o contator vai alimentar um motor de gaiola, que tem corrente de partida neste nível, ou seja, de seis vezes a corrente nominal.

O contator não precisa atender a este nível de sobrecorrente de estabelecimento no caso da ponte retificadora, pois ela alimenta o circuito intermediário via circuito de pré-carga, que limita a corrente de estabelecimento. Desta forma, usa-se a categoria de emprego AC2, que permite ao contator ter uma corrente de estabelecimento de 2,5 vezes a nominal, ou até mesmo a categoria de emprego AC1, que não tem capacidade de sobrecorrente de estabelecimento. E isto vai depender do limite estabelecido pelo circuito de pré-carga projetado para o retificador.

O circuito de pré-carga pode estar na entrada do retificador ou no circuito intermediário (figura 5.4). Os fabricantes de conversores de frequência fornecem os retificadores já com o circuito de pré-carga definido e dimensionado conforme a capacidade de sobrecarga, que o sistema deve suportar. Então, para o dimensionamento do contator, deve-se observar a indicação do fabricante do retificador, pois é ele quem define a limitação de corrente realizada pelo circuito de pré-carga.

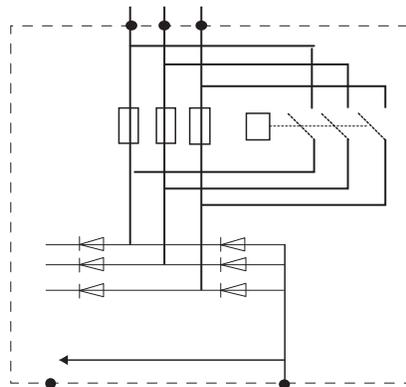


Figura 5.4 – Exemplo de circuito de pré-carga

5.1.2 – Proteção de curto-circuito do retificador

Para se garantir a proteção dos semicondutores (no caso, diodos) e mesmo dos tiristores, há a necessidade de usar fusíveis ultrarrápidos. A área de condução dos semicondutores é muito pequena em razão da capacidade de corrente que conduz. A capacidade nominal de condução de corrente é

definida em conjunto com a necessidade de refrigeração. As perdas que ocorrem na pastilha semicondutora requerem o uso de dissipadores de calor, que são dimensionados para gerar a capacidade nominal de corrente da pastilha semicondutora. Quando ocorre um curto-circuito, porém, a alta corrente circulante sobreaquece o semicondutor muito rapidamente. Neste ponto, qualquer dispositivo de proteção do curto deveria abrir com maior velocidade do que o tempo necessário para que o semicondutor se aqueça e sofra danos. O único dispositivo que consegue proteger o semicondutor, diodo ou tiristor – ou seja, que tem uma constante térmica de aquecimento mais rápida que o semicondutor – é o fusível ultrarrápido. Ao passar por ele, o aquecimento da alta corrente provoca a fusão, o que interrompe o circuito, impedindo que haja o aquecimento da corrente passando pelo semicondutor. O aquecimento ocorre em função do tempo e do quadrado da corrente passando pelo elemento. Portanto:

$$i_{\text{semicondutor}}^2 \cdot t \geq i_{\text{fusível}}^2 \cdot t \leftrightarrow i_{\text{fusível}}^2 \cdot t \leq i_{\text{semicondutor}}^2 \cdot t$$

A figura 5.5 mostra a curva de capacidade do semicondutor: no exemplo em questão, um tiristor de 200A. A curva revela que quanto maior é a corrente, menor é o tempo em que o tiristor a suporta. No caso do fusível, acontece a mesma coisa. Como pode se ver, existe uma área em que o fusível interrompe a corrente, fundindo o elo mais rapidamente do que o tiristor, protegendo-o. Há outra em que a capacidade do tiristor está abaixo do fusível. Neste caso, ele não é protegido pelo fusível; pelo contrário, protege-o. Observa-se que esta área não está na condição de curto-circuito, mas sim de sobrecarga.

São consideradas sobrecargas as condições de correntes da ordem de três a quatro vezes a nominal. Curto-circuito é a sobrecorrente maior do que cinco vezes a nominal. Os fusíveis não têm a função de proteger sobrecarga, mas sim curto-circuito. A proteção de sobrecarga é feita pelo inversor, que tem internamente um relé eletrônico responsável por efetivar essa proteção. Somente ao conhecer a curva característica do semicondutor é possível colocar um fusível ultrarrápido, com curva característica correspondentemente mais rápida. Os fabricantes dos retificadores indicam qual fusível deve ser usado para garantir a proteção dos semicondutores. Erroneamente, e não raro, existe no mercado popular a crença de que algum fusível ultrarrápido precisa ser colocado para proteger o semicondutor, não importando o tipo. Na verdade, o que se deve fazer é instalar o fusível que atenda às necessidades

do semiconductor. Não basta ser qualquer um: tem que obedecer as curvas características de resposta.

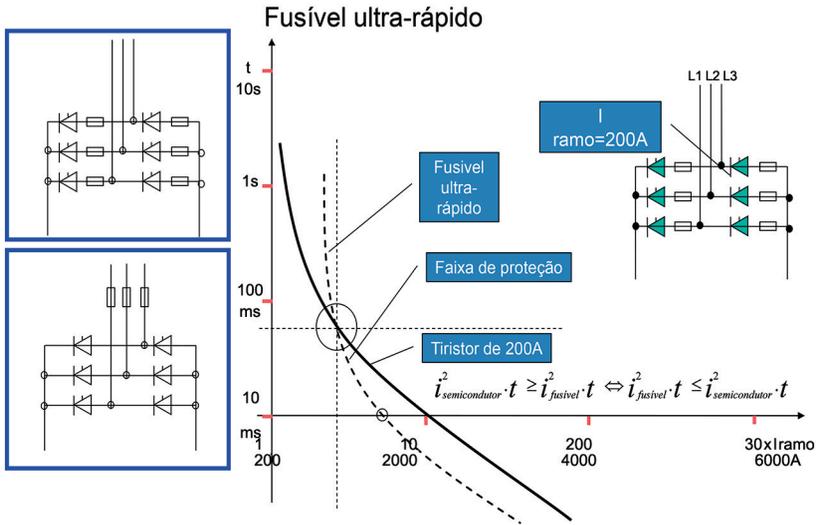


Figura 5.5 – Proteção por fusíveis ultrarrápidos – faixas de proteção

Conforme as necessidades, o fabricante pode decidir usar fusíveis na linha ou no ramo do tiristor (ou diodo). No ramo do semiconductor, com uma corrente menor, pode ser mais fácil conseguir uma curva característica para o fusível que melhor atenda às necessidades. Neste caso, a corrente é 58% da contínua e, na linha, 82%.

Conclusão: Para garantir a proteção dos semicondutores dos retificadores, é necessário utilizar fusíveis ultrarrápidos. Disjuntores não garantem a proteção dos semicondutores, mas apenas dos componentes do circuito como contadores, cabos e outros.

5.1.3 – Reatores de linha na alimentação do retificador

Na alimentação do retificador, o reator de linha tem basicamente duas funções:

5.1.3.1 – Reator de comutação

No momento da comutação de uma fase para a outra na condução de corrente, as fases se encontram quando estão conduzindo energia. Então, um curto-circuito ocorre entre elas, com duração correspondente ao tempo de comutação (figura 5.6). Quando a comutação ocorre próxima ao ângulo zero, como em diodos, as tensões das fases são de valores iguais, de tal forma que a tensão que alimenta o curto seja praticamente zero. Entretanto, uma fase caminha no sentido de aumentar a tensão e outra no sentido de diminuí-la, provocando diferenças: o resultado é um aumento da tensão, que alimenta o curto.

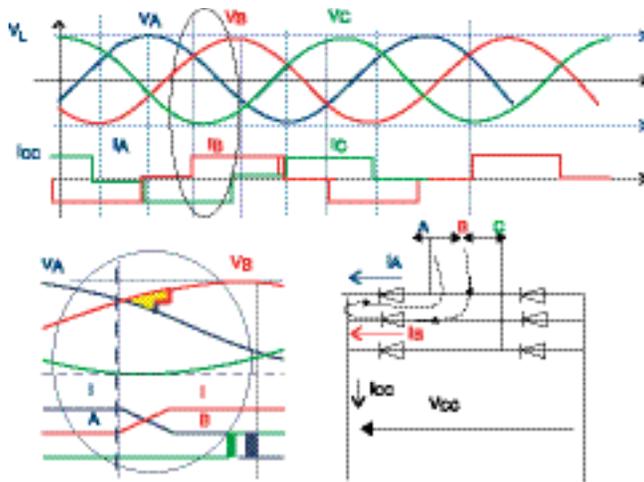


Figura 5.6 – Comutação entre fases na retificação

Uma corrente de curto, consequentemente, passa a existir. Ela diminui a corrente do semicondutor que conduz a da carga e aumenta a corrente daquele que está iniciando a condução. Ao término da comutação, uma nova fase assume a condução da corrente de carga. A carga praticamente não sente a comutação. A comutação é sentida na corrente da rede de alimentação e entre as fases que participam do processo. A figura apresenta um zoom exemplo do instante da comutação da fase A para a fase B.

Inicialmente, os elétrons da camada N da pastilha do semicondutor estão estacionados. Quando começa o processo de condução da corrente, nem todos entram imediatamente em operação, mas sim apenas os mais ativos. Isto significa que não há distribuição homogênea das atividades dos elétrons e, como consequência, a corrente se concentra em uma região determinada

da pastilha. Por isso, a resistência de condução aumenta expressivamente, provocando altas perdas térmicas e até a queima da pastilha. É preciso de um tempo para atrasar o crescimento da corrente, permitindo que as cargas se distribuam pela pastilha e, assim, ela possa conduzir a corrente por inteiro. A figura 5.7 apresenta um exemplo da evolução no tempo da corrente até que a pastilha entre em condução.

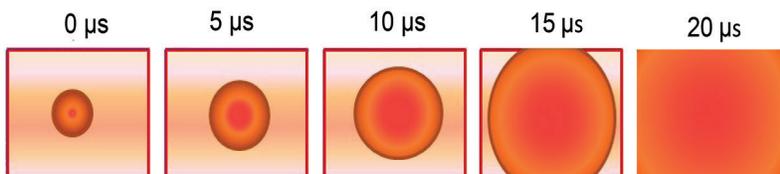


Figura 5.7 – Evolução no tempo da distribuição da corrente na pastilha

Atrasar o crescimento da corrente no interior da pastilha significa estabelecer um di/dt menor do que o especificado pelo semiconductor. Os fabricantes de semicondutores costumam explicar em seus catálogos qual é o di/dt máximo aceitável por seus produtos. Este parâmetro deve ser obedecido sob o risco de queima. Logo, para alcançar esse di/dt deve ser instalado um reator na entrada da ponte retificadora, denominado reator de comutação.

Este exemplo se refere à ponte de diodos. O mesmo se aplica para uma ponte de tiristores. Neste caso, como o ângulo de disparo é variável, a tensão de curto-circuito na comutação é maior do que a realizada na ponte de diodos. Além disso, uma vez que a tensão de curto é maior, o crescimento da corrente também é mais rápido.

5.1.3.2 – Redução de componentes harmônicas

Nas descrições anteriores, apresentamos a corrente contínua retificada como alisada. No entanto, a corrente contínua contém um *ripple*, provocado pela retificação da onda senoidal da rede de alimentação, conforme mostra a figura 5.8.

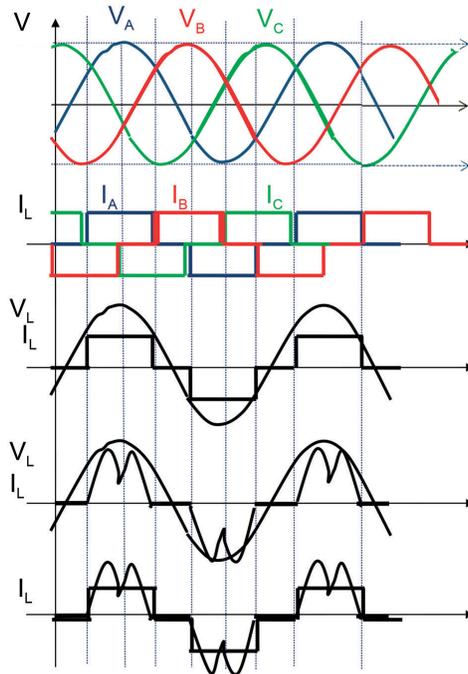


Figura 5.8 – Retificação da onda senoidal

Em cada fase, a corrente é distorcida, não senoidal (figura 5.9). Em todos os estudos de engenharia, trabalha-se com ondas senoidais ou com ondas contínuas, tensão e corrente contínua.

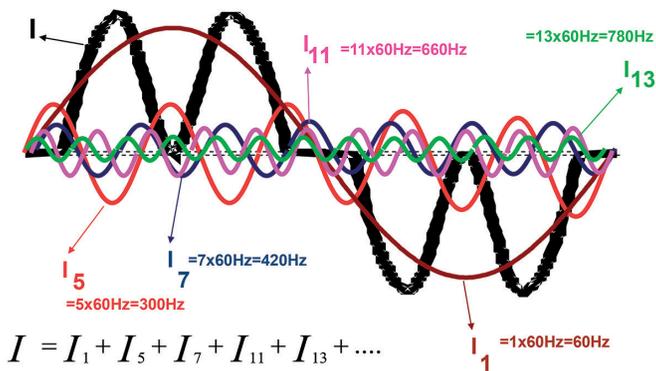


Figura 5.9 – Forma de onda de corrente não senoidal

Quando existe alguma onda distorcida, há necessidade de transformá-la em senoidal por meio da série de Fourier. Esta onda modificada apresenta várias componentes harmônicas: fundamental, quinta harmônica, sétima harmônica etc. Elas funcionam de acordo com a seguinte equação:

$$h = \eta \cdot 6 \pm 1 \text{ onde } \eta = 1, 2, 3 \dots$$

O resultado são as harmônicas 5, 7, 11, 13, 17, 19...

Visualizando-se o espectro de harmônicos em uma medição, tem-se algo similar à figura 5.10.

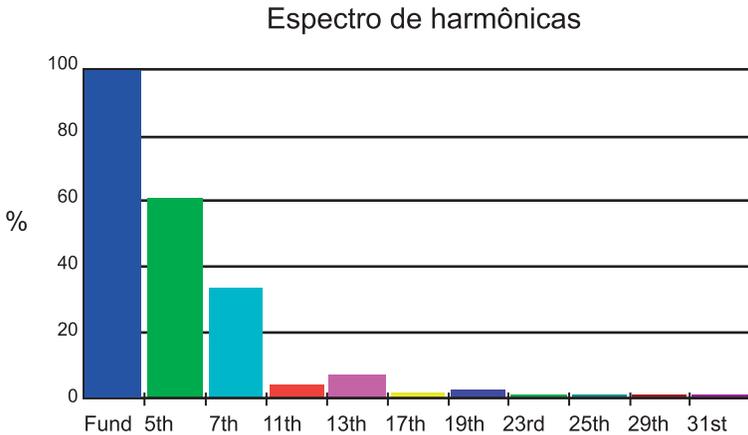


Figura 5.10 – Exemplo de espectro de harmônicas

Observa-se que quanto maior é a ordem da harmônica, menor é a amplitude da onda senoidal correspondente. Por outro lado, quanto menos distorcida é a onda, ou seja, quanto mais se aproxima da onda senoidal, menores são os níveis das amplitudes das harmônicas.

A indutância existente na rede de alimentação tem grande influência nesta forma de onda. Ela depende da potência de curto-circuito e do ponto onde o retificador está conectado (figura 5.11). Em relação à potência de curto-circuito, são válidas as seguintes equações:

$$S_{cc} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{cc}$$

$$V = \sqrt{3} \cdot Z_{cc} \cdot I_{cc}$$

$$S_{cc} = \frac{v^2}{z_{cc}} \approx \frac{v^2}{x_{cc}}$$

$$X_{cc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_L$$

Quanto maior é a potência, menor é a impedância. A maior parte da impedância de curto-circuito é formada pela reatância da rede de alimentação. Em contrapartida, quanto menor é a potência de curto-circuito, maior é a reatância natural da rede de alimentação, que inclusive já pode atender à necessidade de di/dt dos semicondutores.

Quanto maior é a reatância da rede de alimentação, ou seja, quanto menor é a potência de curto circuito. Logo, menos distorcida fica a onda de corrente na linha, pois a própria reatância da rede já a alisa. Existe, portanto, uma relação entre as potências do curto-circuito no ponto onde o retificador está conectado e a do retificador. Para determinado retificador, a reatância é considerada alta quando se origina de uma potência de curto-circuito menor do que 15 vezes a dele. É considerada baixa, quando se origina de uma potência de curto-circuito maior do que 50 vezes a dele. A distorção da onda de corrente é influenciada por estas condições.

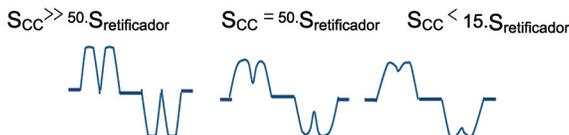


Figura 5.11 – Influência da indutância na forma de onda da corrente

Na menor potência de curto-circuito, menos deformada fica a onda de corrente, minimizando as harmônicas de corrente geradas pelo retificador.

As impedâncias das reatâncias são especificadas em termos de valores percentuais. Por exemplo, uma de 2% significa que passando pela reatância, sua corrente nominal terá uma queda de tensão de 2% da nominal (figura 5.12).

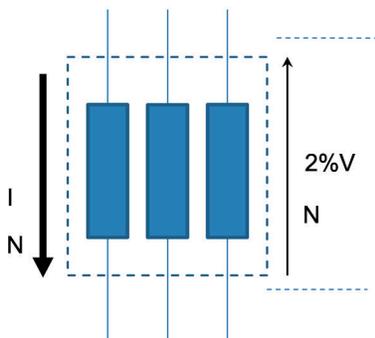


Figura 5.12 – Especificação de reatâncias de linha

Conclusão: Com o objetivo de atender às condições de redução dos níveis de harmônicos e dos di/dt dos semicondutores, coloca-se na entrada da ponte retificadora o reator de linha no valor típico de 2% para retificadores a diodos e de 4% para retificadores a tiristores.

Assim, em uma instalação com retificador a ponte de diodos, é preciso observar que (figura 5.13):

- Existem projetos simples que têm disjuntores em lugar de fusíveis ultrarrápidos. Conforme visto anteriormente, esta medida garante a proteção de cabos, contator e reator, mas não da ponte retificadora de semicondutores.
- Outros não colocam reator de linha e, por isso, estão sujeitos a maiores riscos de queima de semicondutores, além da possibilidade de interferências de harmônicos na rede, em outros conversores e no próprio retificador.
- Não colocar contator e somente um disjuntor elimina a proteção do retificador e as possibilidades de comando automático de energização.

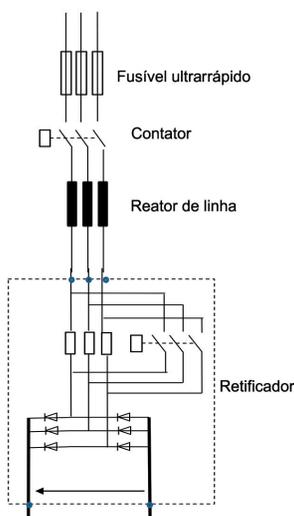


Figura 5.13 – Configuração da instalação com retificador a diodos

5.2 – Retificadores básicos em ponte de tiristores

Neste caso, são válidos todos os comentários feitos anteriormente sobre as pontes retificadoras de diodos. Há ainda outros pontos a se considerar, que serão detalhados abaixo.

5.2.1 – Circuito de pré-carga do retificador a tiristor

Uma vez que a ponte de tiristores permite o controle via ângulo de disparo, usa-se o controle para fazer a pré-carga do banco de capacitores do circuito intermediário. Algumas configurações possíveis se encontram abaixo:

1) O circuito exige controle dos pulsos durante o processo de pré-carga. Dependendo do sistema a ser utilizado para esta tarefa, o alto custo pode inviabilizar economicamente a operação (figura 5.14).

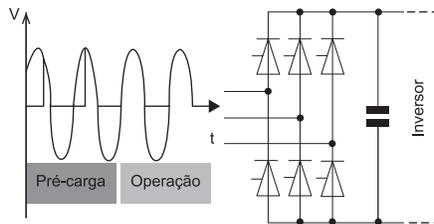


Figura 5.14 – Pré-carga via controle de pulsos em tiristores

2) A pré-carga é feita via ponte de diodos e resistor. Somente após este processo ser completado os tiristores são liberados e os pulsos de disparo ocorrem para se obter operação similar aos diodos. Os custos diminuem e o controle é realizado sobre a tensão constante do circuito intermediário (figura 5.15).

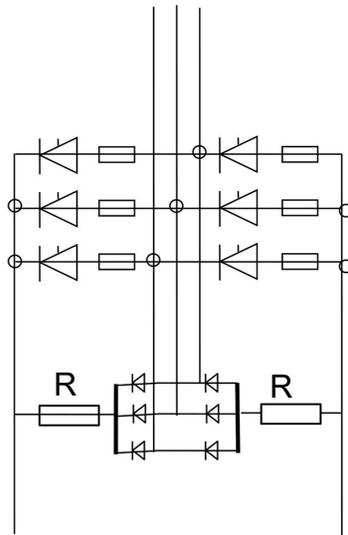


Figura 5.15 – Pré-carga via ponte de diodos e resistor

5.2.2 – Fator de potência para a rede de alimentação

Quando é feita a decomposição da corrente não senoidal de linha, na entrada da ponte retificadora, a primeira harmônica (fundamental) fica em fase com a tensão da rede de alimentação, no caso de ponte de diodos, pois o ângulo de disparo é zero (figura 5.16). Deste modo, o fator de potência é 1, desconsiderando-se as outras harmônicas. O retificador fornece potência ativa e o circuito intermediário, a potência reativa indutiva que a máquina necessita para operar. Caso as outras harmônicas sejam consideradas, o fator de potência diminui para próximo de um (por exemplo, 0,96), dependendo da reatância indutiva da linha.

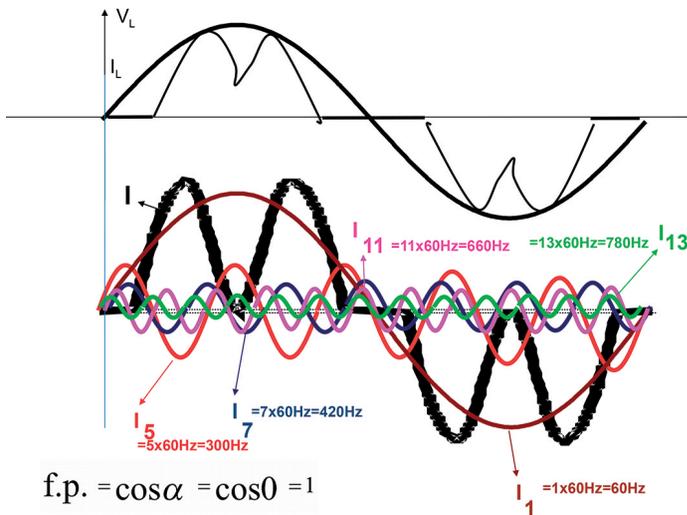


Figura 5.16 – Fator de potência na retificação – Ângulo 0°

Para o caso de ponte trifásica de tiristores, a corrente fundamental na decomposição de harmônicas fica defasada da tensão correspondente ao ângulo de disparo. Ou seja, o fator de potência visto pela rede é variável e reage conforme o ângulo de disparo (figura 5.17).

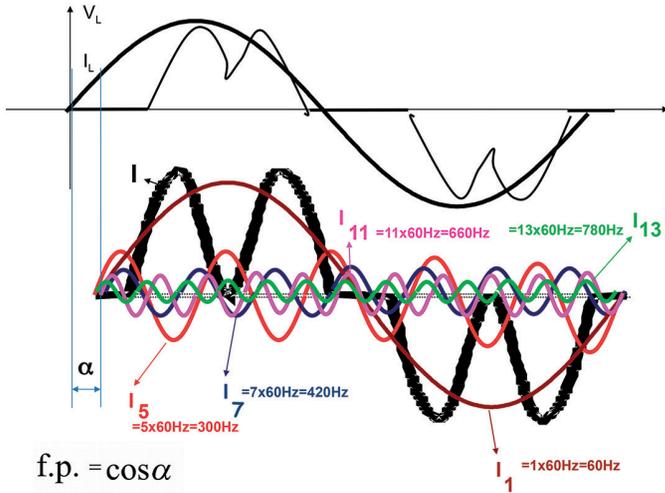


Figura 5.17 – Fator de potência na retificação

5.2.3 – Frenagem regenerativa com retificador a tiristor

Por convenção, a potência regenerativa – isto é, a potência que a carga devolve para a rede de alimentação – é negativa, enquanto a que a carga consome tem valor positivo. Considerando-se uma tensão do circuito intermediário constante, a inversão de potência requer inversão de corrente (figura 5.18).

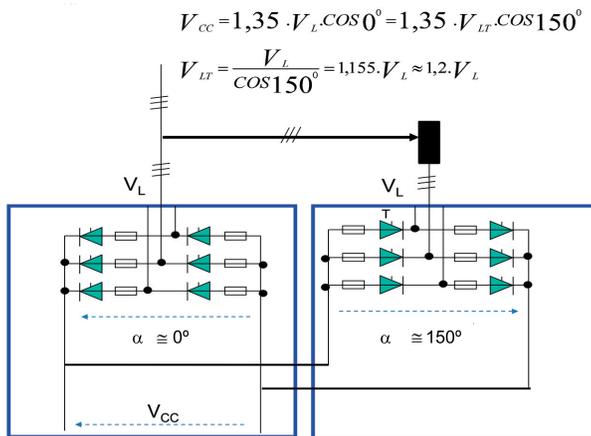


Figura 5.18 – Regeneração com retificador a tiristor

A corrente negativa é a que sai do circuito intermediário em direção à rede de alimentação. No entanto, como os tiristores não conduzem em sentido contrário, é preciso colocar uma ponte retificadora em sentido antiparalelo, ou seja, reverso. Desta maneira, o circuito instalado com ponte retificadora direta e ponte retificadora inversa se apresenta da forma apresentada na figura anterior.

A tensão constante do circuito intermediário é estabelecida pela retificação, com os tiristores operando com um ângulo de disparo que permita a máxima tensão: ângulo zero, com a ponte direta de tiristores operando como diodos.

Quando ocorre frenagem na carga, a tensão do circuito intermediário sobe. Se aumentar acima de 10% da sua tensão nominal, significa que está havendo frenagem e é preciso devolver energia para a rede. Uma oscilação de mais ou menos 10% não ativa a frenagem, uma vez que é normal para um sistema elétrico. A ponte retificadora inversa em ligação antiparalela opera como inversor, com ângulo de disparo acima de 90° .

Para fazer a maior tensão invertida, correspondente a zero grau da ponte retificadora direta, a ponte retificadora inversa deve funcionar em um ângulo da ordem de 180° . Entretanto, como precisa trabalhar a partir de uma tensão maior devido à frenagem, deve ser alimentada por um transformador ou autotransformador para elevá-la. Por outro lado, a ponte retificadora inversa pode operar no máximo a 150° por causa do ângulo de comutação. Por este motivo, a tensão secundária do transformador ou autotransformador deve ser pelo menos 20% acima da nominal da rede de alimentação.

Chegou a hora de analisar a comutação entre fases para uma operação que realiza a tensão máxima no circuito intermediário para a ponte inversa, com o ângulo máximo de 150° . Conforme vimos anteriormente, durante a comutação a passagem da corrente de uma fase para a outra promove um curto-circuito entre ambas, com a durabilidade do respectivo ângulo de comutação.

Se a comutação ocorrer com um ângulo maior que 150° , não haverá tempo suficiente para que ela seja finalizada antes dos 180° . Então, o tiristor, que deveria bloquear a corrente, adquire novamente tensão positiva antes de passar totalmente a corrente para a outra fase. Conseqüentemente, volta a fazer a condução, promovendo e mantendo o curto-circuito entre as fases por um longo período, o que causa risco de queima do tiristor ou abertura do fusível ultrarrápido. Para se garantir o tempo adequado, portanto, o ângulo

máximo de operação da ponte inversa deve ser de 150° , conforme o cálculo apresentado (figura 5.19).

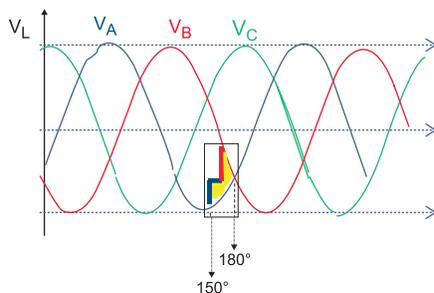


Figura 5.19 – Ângulo máximo de operação inversora

Conclusão: Para implantar a operação com regeneração de energia para a rede utilizando ponte de tiristores, há necessidade de controlar a energia com uma ponte adicional e, no mínimo, um autotransformador. Por isso, muitas vezes o trabalho se torna economicamente inviável ou deve apresentar um forte motivo que o justifique, como a repetitividade de operação de frenagem, por exemplo.

Existem no mercado várias aplicações que se encontram operando com essa configuração de regeneração de energia, como pontes rolantes, guias etc. No entanto, para projetos modernos, essa solução não mais se aplica, pois existem outras tecnologicamente mais avançadas, utilizando transistores de potência, que serão apresentados a seguir.

5.3 – Retificadores básicos em ponte de transistores

São retificadores em que os diodos da ponte são substituídos por transistores de potência. Os transistores são disparados no ponto de condução, com ângulo zero, correspondente à retificação da ponte de diodos. Ou seja, os transistores se comportam equivalentemente aos diodos.

As formas de onda das correntes por fase ocorrem como na ponte de diodos, com as mesmas oscilações, *ripples* etc. Isto também acontece com as ondas de tensão retificada para o circuito intermediário (figura 5.20), assim como com a incidência de harmônicos no sistema – neste caso, as formas de ondas são iguais e, assim, as decomposições das harmônicas são equivalentes. Em suma, o comportamento para o sistema é o mesmo que para a ponte de diodos.

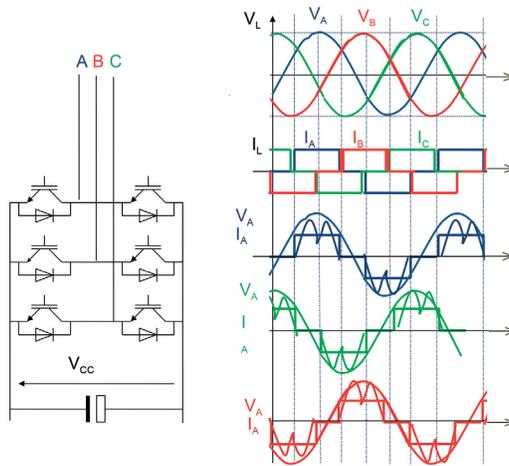


Figura 5.20 – Retificação por transistor similar à retificação por diodos

A grande vantagem deste sistema é que a ponte de diodos, em conexão antiparalela com a ponte de transistores, é capaz de regenerar energia para a rede de alimentação. Uma vez que o fluxo de energia acontece em ambos os sentidos, a ponte trabalha enviando energia da rede para a carga e recebendo energia da carga para a rede, sem nenhum sistema adicional. O comportamento perante a rede é similar a uma ponte de diodos, com o acréscimo da regeneração de energia para a rede (figura 5.21).

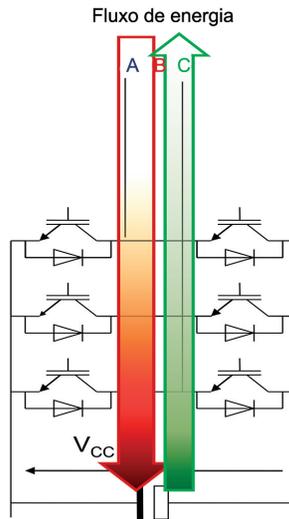


Figura 5.21 – Regeneração de energia

INSTALAÇÃO E MONTAGEM

Até agora, este trabalho abordou a carga, o motor, os inversores, o circuito intermediário, o retificador, a rede, as malhas de regulação de corrente, velocidade e posição e tudo que envolve desde a carga até a rede de alimentação. Ao longo dos capítulos, observa-se a evolução de conversores e inversores de frequência, que promoveu a estes equipamentos excelente qualidade, aplicabilidade e confiabilidade. Pode-se dizer que eles hoje são muito confiáveis.

No entanto, pode acontecer de um mesmo equipamento funcionar bem em um determinado local, e apresentar uma série de problemas em uma aplicação similar, mas em outro lugar. Em grande parte, isto acontece principalmente por causa da instalação e da montagem. Quando estes trabalhos são bem feitos, este tipo de máquina funciona por anos – mais de dez, até vinte – sem apresentar qualquer defeito. Portanto, vamos tratar agora do que é preciso levar em conta para ter uma instalação confiável nas aplicações que envolvem variações de velocidade com máquinas elétricas em corrente alternada.

7.1 – Efeitos da modulação PWM na malha de terra

O capítulo 3, em 3.2.3.2, apresentou os efeitos da modulação PWM sobre os cabos e a isolação. Também abordamos as possibilidades de solução para estes problemas por meio do uso de filtros como reator de saída, de filtros dv/dt ou de máquinas elétricas já construídas com isolação para dv/dt e filtros senoidais.

Pelos cabos, percorrem uma corrente de alta frequência, originada pela modulação dos transistores na execução do PWM (figura 7.1). Corresponde à frequência da modulação, que pode ser de 1,5 kHz até 5 kHz, dependendo do tipo de aplicação a que se destina o inversor. O mesmo acontece com a corrente que passa pela capacitância da isolação da máquina elétrica (figura 7.2).

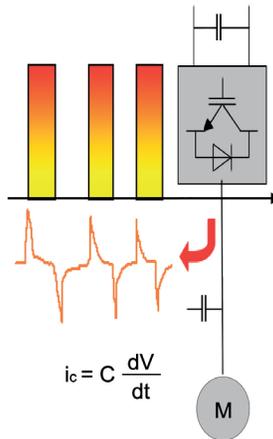


Figura 7.1 – Circulação das correntes pela capacitância dos cabos

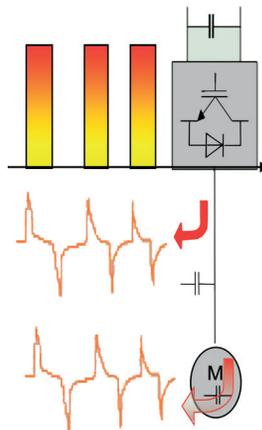


Figura 7.2 – Circulação das correntes pela isolação das máquinas

Uma vez que o leito de cabos e a carcaça da máquina elétrica estão aterrados, as correntes vão para a malha de terra. Toda corrente que sai de

uma fonte pode circular por qualquer circuito, mas retorna à fonte de origem, que é a parte inversora, onde é gerado o PWM. A modulação provoca as correntes pelas capacitâncias e elas retornam ao inversor. O caminho destas correntes é o mais fácil, com menos impedância, que pode ser a blindagem de cabos blindados: de *encoder*, de rede de comunicação etc.

Como se sabe, correntes de alta frequência estão presentes nas superfícies dos condutores e procuram circuitos que ofereçam maiores áreas para circular, como é o caso de cabos blindados. Por isto, elas podem provocar interferências e contaminações nos sinais dos *encoders* e da rede de comunicação, culminando em falhas de operação e paradas indesejáveis.

O inversor se encontra aterrado à malha de aterramento do painel elétrico onde está instalado, seja por meio da malha na sala elétrica ou de aterramento da máquina, nos casos em que o painel elétrico se encontra montado diretamente na máquina. Desta forma, estas correntes poderão chegar até o inversor também por este caminho (figura 7.3), que é um dos mais prováveis, e não somente pelos cabos blindados de *encoders* e de rede de comunicação.

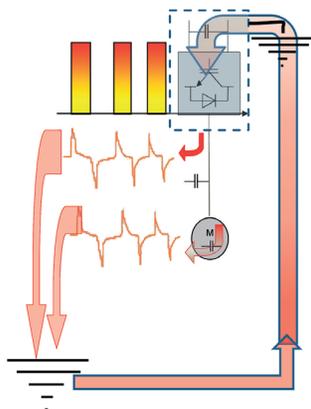


Figura 7.3 – Prováveis caminhos de circulação das correntes

Entre os pontos de terra da carcaça do motor, do leito de cabos e do painel elétrico, onde está instalado o inversor, normalmente há diferença de potencial, ou seja, uma impedância. Estas correntes, passando pelas impedâncias, provocam tensão na malha de terra. E, como têm alta frequência, consequentemente produzirão tensões de alta frequência. São as tensões de interferência em alta frequência, que alguns chamam de tensões de radiointerferência (figura 7.4). Podem gerar, como o nome deixa claro, radiointerferência e

contaminação sobre todos os equipamentos conectados à malha de terra, com a possibilidade de produzir falhas na operação e paradas indesejáveis.

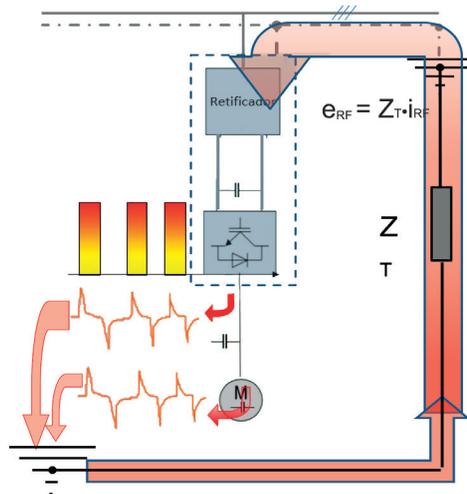


Figura 7.4 – Formação das tensões de interferências

As normas estabelecem a impedância máxima aceitável na malha de terra. Quando há poucos inversores instalados na planta e a impedância de terra está dentro dos valores normalizados, a tensão de interferência é pequena. Logo, ocorrem poucos problemas de interferência sobre os equipamentos conectados na malha de terra. Entretanto, à medida que o número de inversores aumenta, estas correntes também sobem. Mesmo que a impedância de terra esteja dentro dos valores sugeridos pelas normas, falhas podem ocorrer, pois a tensão de interferência aumenta não por questões da impedância, mas sim pelo volume de corrente. Quando isto acontece, muitos dizem que não se trata de problemas de terra, pois a medição aponta que tudo está dentro das condições sugeridas pelas normas. Pode até ser verdade, mas as normas não consideram o volume das correntes, que também exercem grande influência nas tensões de interferências.

$$e_{RF} = Z_T \cdot i_{RF}$$

Como as correntes querem voltar para a fonte de origem, que é a parte inversora geradora do PWM, o objetivo é facilitar o caminho para que elas percorram este caminho, mas por um circuito que não produza interferências.

Se este circuito não for criado, as correntes irão buscar caminhos mais fáceis, como cabos de *encoders*, de redes de comunicação etc., ou seja, cabos blindados. Como resultado, haverá interferências nos sinais, produzindo falhas e paradas indesejáveis. Uma das soluções para isto é instalar cabos blindados de potência (figura 7.5) na alimentação da máquina elétrica, motores e servomotores.

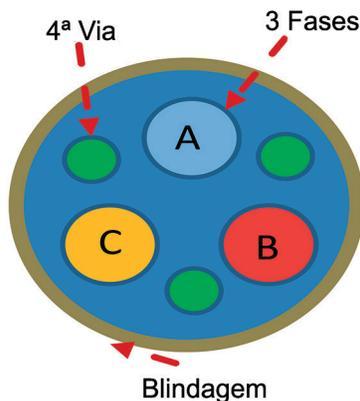


Figura 7.5 – Cabo blindado

As três vias formam um trifólio de tal forma que o campo produzido por cada fase se soma, cancelando-se no resultado final. As vias que formam o quarto cabo também se encontram em trifólio correspondente a 1/3 da secção das vias de potência. Deve ser aterrado em ambos os lados para garantir equalização do potencial de terra. O mesmo deve acontecer com a blindagem.

Este cabo blindado deve conter três vias, uma para cada fase de alimentação da máquina elétrica, mais uma que tem a função de promover a equalização de potencial de terra e deve ser conectada entre o terra do motor e o do painel elétrico, onde o inversor está instalado, ou diretamente no ponto de terra do inversor, o que é ainda mais eficiente. A blindagem do cabo blindado também deve ser conectada entre o terra do motor e o do painel elétrico ou diretamente no ponto de terra do inversor. Por ser responsável pela equalização de potencial, a quarta via deverá ter uma bitola mínima de 10 mm² ou uma secção mínima correspondente a 1/3 da secção da via de alimentação da fase. A instalação deve seguir o que está demonstrado na figura 7.6.

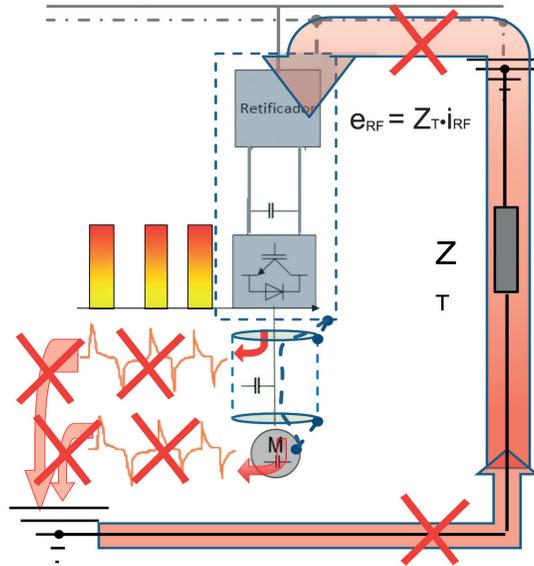


Figura 7.6 – Circulação de corrente de terra – cabo blindado

As correntes de alta frequência procuram circular pelo meio externo dos cabos e por grandes áreas. A blindagem facilita esta passagem, levando-as diretamente para o inversor sem passar pela malha ou minimizando a passagem pela malha de terra, diminuindo a tensão de interferência. Os cabos blindados de potência são caros, mas ainda assim geram menos custos do que ter que instalá-los após várias tentativas de operação sem sucesso, com falhas e paradas indesejáveis. A instalação de cabos blindados de potência para corrigir problemas, sem planejamento anterior, é muito mais custosa do que o próprio cabo.

Quando se trata de operações com sistema de posicionamento e sincronismo, ou seja, sistemas *motion control*, a frequência de modulação para formação da onda senoidal PWM é de 5 kHz. Além disso, a precisão de operação é muito alta, portanto, mais suscetível às interferências. Por isso, a formação da tensão de interferência é muito mais crítica. Para esses tipos de sistema, a instalação de cabos blindados é imprescindível.

Observação sobre a instalação de cabos blindados

Conforme já foi apresentado, as correntes de alta frequência procuram área para circular e, por esse motivo, é preciso instalar cabos blindados de potência. Há que se tomar todo cuidado e até mesmo supervisionar a execução

da conexão da blindagem com o ponto de terra, tanto do lado do inversor quanto da máquina elétrica, motor ou servomotor. Se forem utilizados terminais finos ou a junção da blindagem reduzir a área para a passagem destas correntes, a efetividade do cabo blindado perde todo o efeito. Gasta-se muito dinheiro e o resultado fica desprezível. Portanto, a conexão do cabo blindado ao ponto de terra tem que ser realizada com bastante área, permitindo que a corrente flua, tornando efetivo o uso do cabo blindado.

Para outros sistemas mais simples, em que a frequência de modulação PWM fica entre 1,5 kHz e 2,5 kHz, a utilização de cabos blindados de potência pode não ser necessária, ao contrário da quarta via, conectada conforme descrito anteriormente. No entanto, quando há uma grande quantidade de inversores, como nos casos de indústrias de papel e celulose e siderúrgicas, a malha de terra se encontra sobrecarregada com alto volume de correntes, o que torna aconselhável – e, em algumas situações mais críticas, que serão abordadas mais adiante, imprescindível – a aplicação de cabos blindados. Desta forma, promove-se a redução das correntes que circulam pela malha de terra, reduzindo as tensões de radiointerferência e, conseqüentemente, a contaminação para outros equipamentos. Há casos em que é necessária a instalação de filtros de radiointerferência, chamados filtros de EMC – Compatibilidade Eletromagnética.

7.2 – Compatibilidade eletromagnética

Acima, tratamos de uma apresentação de recursos para evitar a formação da tensão de interferência, resultante da condução das correntes pela malha de terra, pois:

$$e_{RF} = Z_T \cdot i_{RF}$$

O objetivo, como se sabe, é diminuir ou eliminar a circulação de correntes pela malha de terra. No que se refere à instalação, cuidados adicionais devem ser adotados para evitar a tensão de interferência por condução e por indução, pois toda corrente circulante gera em torno de si um campo, que pode interagir com outros equipamentos, cabos, etc. A esta interação, ou seja, esta compatibilidade pelo fluxo gerado pela circulação da corrente, dá-se o nome de compatibilidade eletromagnética, conhecida como EMC – *Electromagnetic Compatibility*. As interferências geradas por essa compatibilidade

são chamadas de interferências eletromagnéticas EMI, que é o nome mais atual e mais completo daquilo que o passado era denominado radiointerferência RFI – *Radio Frequency Interference*.

Alguns conceitos de compatibilidade eletromagnética sempre devem ser considerados:

1. As normas estabelecem critérios para que os equipamentos sejam construídos de forma **a não produzir** interferências que possam perturbar a operação de outras máquinas. Por isso, estabelecem limites para a emissão de compatibilidade eletromagnética;
2. As normas estabelecem critérios para que os equipamentos sejam construídos de forma **a se tornarem imunes** às interferências que podem perturbar a sua operação em relação a outras máquinas. Por isso, estabelecem limites para a imunidade de compatibilidade eletromagnética;

Os inversores têm a parte de potência com variadas frequências de modulação. Portanto, são grandes emissores de EMC. Ao mesmo tempo, têm a sua própria parte de controle, interligada com outras no processo em que estão inseridos, tornando-se suscetíveis a receber perturbações de EMC. Ou seja, os inversores devem ser imunes, mas também geram interferências EMC. São construídos para atender a ambas as condições por meio de alguns filtros básicos internos. Ainda assim, alguns cuidados devem ser tomados na instalação para que os limites estabelecidos não sejam ultrapassados, com conseqüente insucesso na aplicação.

No nível do usuário, o ambiente onde a instalação ocorre é muito importante para verificar qual é o nível de rigor a ser atendido, conforme as exigências locais da aplicação, em relação à imunidade e à emissão das interferências eletromagnéticas.

7.2.1 – Ambiente industrial planejado

O ambiente industrial diz respeito a um parque fabril planejado, com a sua própria subestação, em que uma malha de terra foi construída e distribuída por toda a planta. A subestação, a sala elétrica, os comandos e a própria máquina estão conectados entre si e a uma única malha de terra, ou seja, a diferença de potencial entre os pontos de terra passa a ser muito pequena e resultante de uma baixa impedância de terra (figura 7.7).

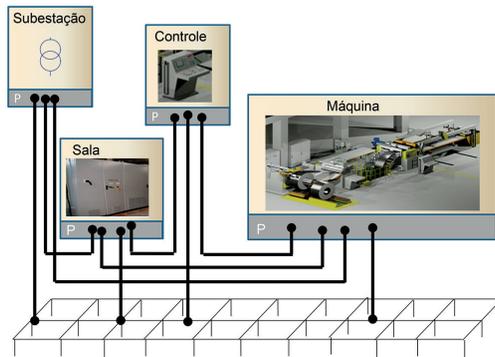


Figura 7.7 – Indústria planejada

Uma vez que há baixa impedância de terra, a tensão de interferência eletromagnética também se torna pequena, ou seja, há pouca contaminação de interferência em toda a malha de terra e em todos os equipamentos conectados a ela. As correntes de alta frequência circulam pelo meio externo dos cabos e por grandes áreas. A blindagem facilita a passagem destas correntes, levando-as diretamente para o inversor, sem passar pela malha ou minimizando a passagem pela malha de terra, diminuindo a tensão de interferência. Observe no diagrama da figura 7.8 que as correntes vão para o inversor via blindagem e, conforme o estado das conexões, promovem algumas divisões: uma parte passa pela malha de terra e retorna ao inversor via filtro EMC de compatibilidade eletromagnética interno do conversor de frequência, diminuindo as interferências, mesmo que elas sejam pequenas, pois as indústrias planejadas têm uma boa malha de terra por toda a planta.

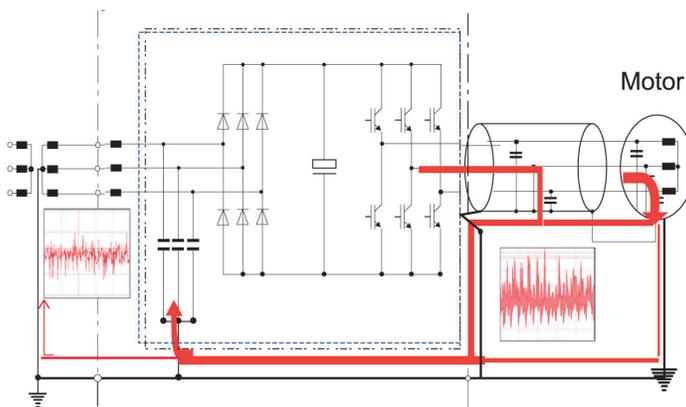


Figura 7.8 – Circulação das correntes na malha de terra

No caso de não se usar cabo blindado, todas as correntes vão para a malha de terra com o objetivo de retornar ao inversor, provocando maior interferência, que é limitada pelo filtro EMC de compatibilidade eletromagnética interno do conversor de frequência. No entanto, se há vários inversores de frequência na planta, o volume destas correntes aumenta, assim como as interferências, e o filtro de EMC pode não ser suficiente para lidar com a demanda, tornando-se necessária a adoção de medidas adicionais de instalação de cabos blindados de potência.

Pode-se concluir que para indústrias planejadas, que apresentam uma malha de terra única para toda a planta, não se faz necessária a instalação de filtros adicionais para reduzir a contaminação no terra gerada pelas interferência eletromagnéticas. Os filtros de EMC internos já são capazes de atender aos níveis gerados nestas plantas.

7.2.2 – Ambiente industrial em distritos industriais indústrias não planejadas

Vamos analisar agora o caso de um ambiente industrial composto por um parque fabril não planejado que tem uma subestação geral para todo o distrito. Na construção da planta, não foi construída uma malha de terra por toda a planta. Quando se descobre esta necessidade, coloca-se uma barra de terra. A entrada de energia, a sala elétrica, os comandos e a própria máquina estão conectados entre si via pontos aterrados por barras individuais, interconectados entre si. Ou seja, nem todos estão ligados a uma mesma malha de terra. Há diferença de potencial entre os pontos de terra, que pode ser grande e culminar em uma alta impedância por causa da conexão descoordenada. Esta indústria pode ser chamada de não planejada (figura 7.9).