

Capítulo XV

Proteção de conversores e semicondutores

Por Cláudio Mardegan*

O objetivo deste capítulo é prover informação para que se possa efetuar ajustes para a proteção de conversores estáticos e semicondutores.

As normas empregadas para a elaboração deste capítulo foram:

- IEC 146 1973 – Semiconductor Convertors
- IEEE Std 444 – 1973 “IEEE Standard Practices and Requirements for Thyristor Converters for Motor Drives”

IEC Duty classes

Na prática, é difícil prever o perfil diário da carga para definir o conversor e, mesmo conhecendo o perfil, ele não pode ser tomado como base para testes e garantias. Assim, o que se faz é prover valores de corrente constantes de carga para uma dada duração. A norma IEC prevê estes ciclos padronizados de

TABELA 1 – IEC DUTY CLASSES	
Duty class	Corrente nominal para conversores e condições de teste (valores em percentual da corrente nominal DC)
I	100% continuamente
II	100% continuamente 150% 1 minuto
III	100% continuamente 150% 2 minutos 200% 10 segundos
IV	100% continuamente 125% 2 horas 200% 10 segundos
V	100% continuamente 150% 2 horas 200% 1 minuto
VI	100% continuamente 150% 2 horas 300% 1 minuto

carga, apresentados na Tabela 1, obtida da norma IEC 146 1973. Esta norma apresenta seis níveis de suportabilidade térmica.

IEEE Duty classes

A norma IEEE Std 444 prevê estes ciclos padronizados de carga na Tabela 1 da citada norma, representado aqui pela Tabela 11.2. Esta norma apresenta 30 “duty classes”, ou seja, 30 ciclos de suportabilidade térmica, tanto para longa como para curta duração.

A Figura 1 mostra um exemplo das curvas tempo versus corrente de um “duty cycle” típico do IEEE, com os pontos característicos:

- A – Ponto de operação nominal
- B – Ponto de suportabilidade de longa duração
- C – Ponto de suportabilidade de curta duração
- D – Ponto de ensaio (teste de curta duração)

Uma vez que a corrente é dada do lado DC, as Tabelas 3 e 4 apresentam como calcular o valor do lado AC, conforme a configuração.

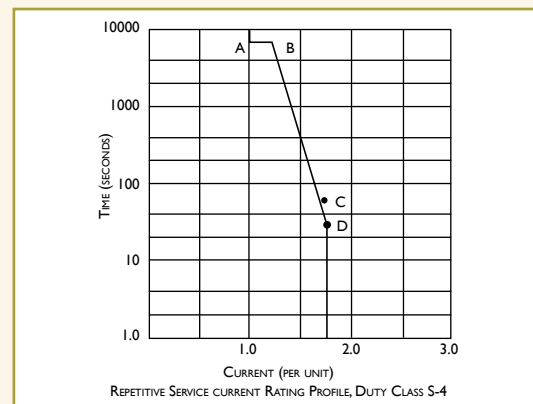


Figura 1 – Exemplo de curva tempo versus corrente, conforme norma IEEE Std 444 – 1973.

TABELA 2 – IEEE DUTY CLASSES

Duty class	Idc	Corrente especificada para		Corrente especificada para		Corrente Típica especificada		Carga Inicial
	Nominal (Ponto A)	Serviços de Longa Duração (Ponto B)		Serviços de Curta Duração (Ponto C)		para Testes Curta-Duração (Não Repetitiva) (Ponto D)		
	[pu]	[pu]	[minutos]	[pu]	[segundos]	[pu]	[segundos]	
S-1	1,00	1,00	150	2,25	10	2,25	60	FL
S-2	1,00	1,25	120	1,75	60	1,75	180	FL
S-3	1,00	1,25	120	1,75	18	1,75	30	FL
S-4	1,00	1,25	120	1,75	30	1,75	60	FL
S-5	1,00	1,00	60	1,75	30	1,75	60	FL
S-6	0,25	0,25	1	0,50	5	0,50	10	NL
S-7	0,25	0,25	1	1,00	5	1,00	10	NL
S-8	0,25	0,25	2	0,75	30	0,75	60	NL
S-9	0,50	0,25	2	0,75	30	0,75	60	NL
S-10	0,25	0,50	2	1,75	18	1,75	30	NL
S-20	1,00	0,25	150	2,00	60	2,00	60	FL
S-21	1,00	1,00	30	2,50	10	2,50	20	FL
S-22	1,00	1,00	60	3,00	5	3,00	10	NL
S-23	0,71	0,82	120	1,75	18	1,75	30	FL
S-24	0,71	0,82	120	1,75	5	1,75	10	FL
S-25	0,71	0,71	30	3,00	5	3,00	10	FL
S-26	0,33	0,33	30	1,50	5	1,50	10	NL
S-28	1,00	1,00	30	4,00	5	4,00	10	FL
S-29	1,00	1,00	150	4,00	5	4,00	10	FL
S-30	1,00	1,00	5	1,50	30	1,50	60	FL

TABELA 3 – CORRENTE DO LADO AC EM FUNÇÃO DA CONEXÃO DO TRANSFORMADOR (CONFORME IEC).

Con- nection No.	Transformer connection		Cell connection	P	q	dgt g	Line side current factor $F_L \cdot I_L$	Cell side current factor $F_c \cdot I_c$	U_{lin} U_{lin}	U_{lin} U_{lin}	U_{lin} U_{lin}	$d_{c/s}$ $\epsilon_{c/s}$	Terminals to be short-circuited at transformer loss test			Total losses in windings in conversion operation	Terminals to be short circuited for $\epsilon_{c/s}$
	Line side	Cell side											A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Single converter, single-way connections																	
1				2	2	2	0.5	$(\frac{1}{\sqrt{2}})$	$(\frac{\sqrt{2}}{\pi})$	1.14	1.14	$(\frac{1}{\sqrt{2}})$	0-1	0-2		$P_s \cdot P_r$ 2	1-2
2				3	3	3	$(\frac{\sqrt{2}}{3})$	$(\frac{1}{\sqrt{3}})$	$(\frac{3}{\sqrt{2}})$	2.09	2.09	$(\frac{\sqrt{2}}{3})$	1-2-3			$P_s \cdot P_r$ 3	1-2-3
3				6	6	6	$(\frac{\sqrt{2}}{3})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	2.09	2.09	1.5 0.5	1-3-5 2-4-6			1.5 $P_s \cdot P_r$ 2	Average of 1-3-5 and 2-4-6
4				6	6	6	$(\frac{\sqrt{2}}{3})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	2.09	2.09	1.5 0.5	1-2 3-4 5-6	2-3 4-5 6-1	Average of 1-3-5 and 2-4-6	$P_s \cdot 2P_r + 3P_s$ 6	Average of 1-3-5 and 2-4-6
5				6	3	3	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{1}{2\sqrt{3}})$	$(\frac{3}{\sqrt{2}})$	2.09	2.42	0.5	1-3-5	2-4-6		$P_s \cdot P_r$ 2	Average of 1-3-5 and 2-4-6
6				6	2	2	$(\frac{1}{\sqrt{3}})$	$(\frac{1}{3\sqrt{2}})$	$(\frac{\sqrt{2}}{\pi})$	1.14	1.14	0.75 0.5	1-3-5 II III	2-4-6 II III		1.125 $P_s \cdot P_r$ 2	1-4 2-5 3-6
Single converter, uniform double-way connections																	
9				2	2	2	1	1	$(\frac{2\sqrt{2}}{\pi})$	1.57	1.57	$(\frac{1}{\sqrt{2}})$	1-2			P_s	1-2
10				6	3	6	$(\frac{\sqrt{2}}{3})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	1.05	1.05	0.5	1-2-3			P_s	1-2-3
11a				12	3	3	$(\frac{1}{2\sqrt{3}})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	1.05	1.05	0.52 0.26	1-3-5 II III	2-4-6 II III	1-3-5 2-4-6	0.035 $(P_s \cdot P_r)$ + 0.910 P_s	Average of 1-3-5 and 2-4-6

TABELA 4 – CORRENTE DO LADO AC EM FUNÇÃO DA CONEXÃO DO TRANSFORMADOR (CONFORME IEEE).

Con- nection No.	Transformer connection		Cell connection	P	q	dgt g	Line side current factor $F_L \cdot I_L$	Cell side current factor $F_c \cdot I_c$	U_{lin} U_{lin}	U_{lin} U_{lin}	U_{lin} U_{lin}	$d_{c/s}$ $\epsilon_{c/s}$	Terminals to be short-circuited at transformer loss test			Total losses in windings in conversion operation	Terminals to be short circuited for $\epsilon_{c/s}$
	Line side	Cell side											A	B	C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
11b	Same as 11a but with two separate transformers		Same as 11a	12	3	3	$(\frac{1}{2\sqrt{3}})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	1.05	1.05	0.52			1-3-5 2-4-6	1.07 P_s	1-3-5 2-4-6
12				12	3	3	$(\frac{1}{2\sqrt{3}})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	1.05	1.17	0.26	Average of 1-3-5 and 2-4-6	2-3 4-5 6-1	1-2 3-4 5-6	1.11 P_s + 0.10 P_r 0.27 P_s	Average of 1-3-5 and 2-4-6
13a				12	3	12	$(\frac{1}{\sqrt{3}})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	2.7	0.524	0.26	1-3-5 II III	2-4-6 II III	1-3-5 2-4-6	0.035 $(P_s \cdot P_r)$ + 0.910 P_s	Average of 1-3-5 and 2-4-6
13b	Same as 13a but with two separate transformers		Same as 13a	12	3	12	$(\frac{1}{\sqrt{3}})$	$(\frac{1}{\sqrt{6}})$	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	2.7	0.524	0.52	1-3-5 II III	2-4-6 II III		1.07 P_s	1-3-5 2-4-6
Single converter, non-uniform double-way connections																	
21				2	2	-	$\sqrt{\frac{2}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{2}{\pi}}$	$(\frac{2\sqrt{2}}{\pi})$	1.57	1.57	$(\frac{1}{\sqrt{2}})$	1-2			P_s	1-2
22				6	3	-	See sub- clause 412.2	See sub- clause 412.3	$(\frac{3\sqrt{2}}{\pi})$	1.05	1.05	0.5	1-2-3			P_s	1-2-3
Double converter connections																	
31				See connection No. 5													
32				See connection No. 5													
33				See connection No. 10													
34				See connection No. 10													

Proteção dos conversores

Nos itens 3 e 4, foram apresentados os valores suportáveis pelos conversores, segundo as normas IEC e IEEE, respectivamente.

A proteção deve permitir a circulação da corrente nominal do sistema, porém, a curva característica do relé de proteção deve ficar abaixo da característica de suportabilidade térmica para o respectivo conversor, de modo a garantir a sua proteção.

Para determinar os valores das correntes do lado AC a partir do lado DC, as Tabelas 3 e 4 podem ser utilizadas.

Devido à característica necessária à proteção dos semicondutores, a curva mais adequada para a proteção de fase é a extremamente inversa.

Deve-se sempre consultar as recomendações dos fabricantes, tanto para saber a real suportabilidade térmica de cada equipamento quanto para os valores recomendados de proteção dos respectivos equipamentos.

Proteção do conjunto

Para a proteção do conversor, é preciso utilizar as suportabilidades térmicas fornecidas pelos fabricantes. Apresenta-se a seguir uma explanação básica para a proteção do conjunto (transformador + cabos + inversor). A Figura 2 mostra duas configurações típicas.

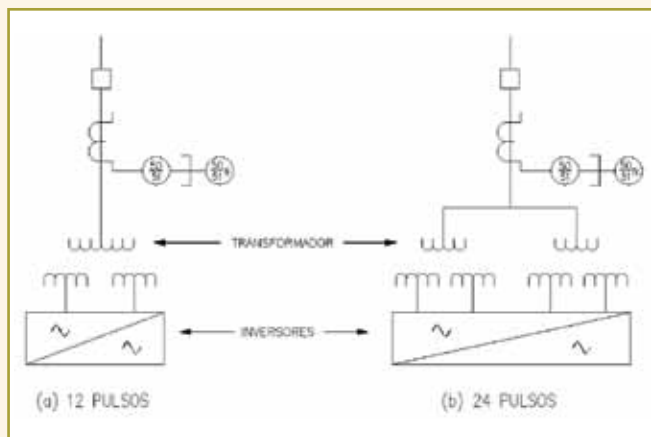


Figura 2 – Topologia típica do conjunto de inversor de frequência e transformador para (a) 12 pulsos e (b) 24 pulsos.

Proteção

Pelo menos os seguintes quesitos devem ser observados para a proteção do conjunto:

- Permitir a circulação da corrente nominal do inversor;
- Proteger termicamente contra sobrecargas do inversor/transformador/cabos, conforme suas características térmicas de curta e longa duração;
- Permitir a corrente inrush do(s) transformador(es);
- Atuar instantaneamente para curto-circuito no primário;
- Atuar temporizadamente para curto-circuito no secundário.

A Figura 3 mostra o gráfico tempo versus corrente para a proteção de um sistema de 12 pulsos.

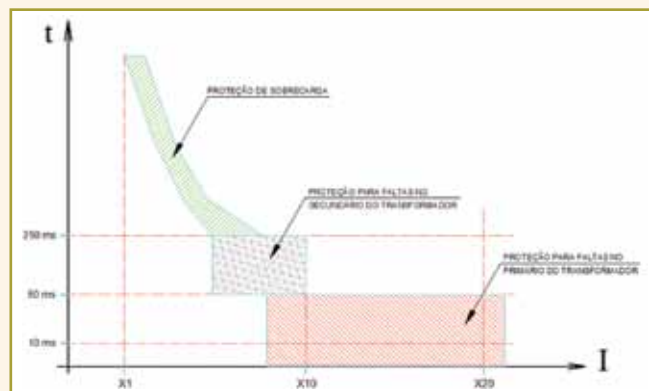


Figura 3 – Coordenograma típico de proteção de um conjunto transformador + inversor.

Proteção contra sobrecarga

Deve permitir o equipamento (inversor) operar à plena carga e também permitir as sobrecargas previstas para as suas respectivas capacidades térmicas (duty cycle).

Proteção para falhas no secundário

Deve permitir que a proteção do inversor opere primeiro. Assim, a proteção primária deve operar de forma temporizada (< 250 ms) para falhas no secundário.

Proteção para falhas no primário

Deve proteger o conjunto para curtos-circuitos no enrolamento primário do transformador/cabo alimentador do transformador e, assim, entrar em operação instantaneamente, porém deve permitir a circulação da corrente inrush, de forma a permitir a sua energização.

Particularidades:

- A corrente que circula quando há queima de um diodo/tiristor, principalmente no caso de um sistema de 24 pulsos, é de difícil determinação.
- Para sistemas de 24 pulsos, fica difícil proteger os quatro enrolamentos secundários, cuja potência individual é $\frac{1}{4}$ da potência total do enrolamento primário, dentro dos critérios do NEC (< 2.5 In).
- Para permitir a circulação da corrente inrush e baixar o instantâneo do primário ao máximo possível, recomenda-se utilizar dois grupos de ajustes: o primeiro, que deve ser utilizado na etapa da energização (ajuste instantâneo < corrente de inrush), e o segundo grupo, utilizando um valor menor de corrente que garanta uma melhor proteção.

*CLÁUDIO MARDEGAN é engenheiro electricista formado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (atualmente Unifei). Trabalhou como engenheiro de estudos e desenvolveu softwares de curto-circuito, load flow e seletividade na plataforma do AutoCad®. Além disso, tem experiência na área de projetos, engenharia de campo, montagem, manutenção, comissionamento e start up. Em 1995 fundou a empresa EngePower® Engenharia e Comércio Ltda, especializada em engenharia elétrica, benchmark e em estudos elétricos no Brasil, na qual atualmente é sócio diretor. O material apresentado nestes fascículos colecionáveis é uma síntese de parte de um livro que está para ser publicado pelo autor, resultado de 30 anos de trabalho.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br