

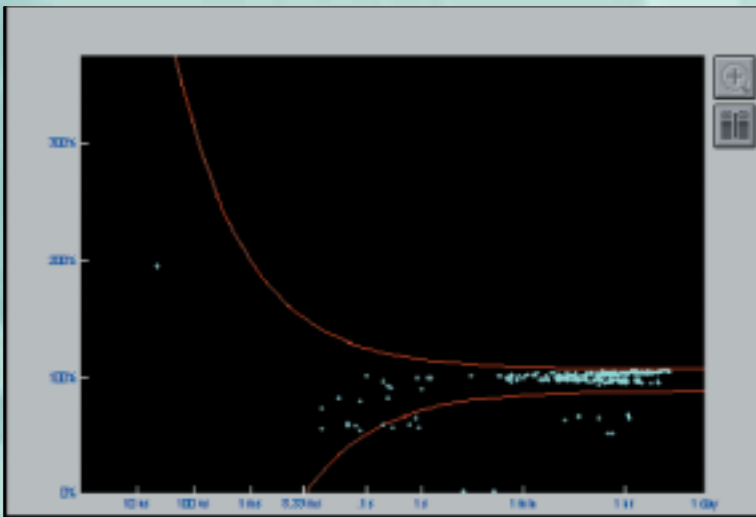
Guia de Aplicação de Qualidade de Energia



Afundamentos de Tensão

Mitigação dos Afundamentos de Tensão

5.3.2



Afundamentos de Tensão

Mitigação de Afundamentos de Tensão

Derek Maule
Claude Lyons Ltd
Abril de 2002, Versão 2

European Copper Institute (ECI)

O Instituto Europeu do Cobre é uma joint venture entre a ICA (Associação Internacional do Cobre) e o IWCC (Conselho Internacional do Cobre Forjado). Por sua qualidade de membro, o ECI age em nome dos maiores produtores de cobre do mundo e dos fabricantes líderes da Europa, na promoção do cobre na Europa. Formado em janeiro de 1996, o ECI é apoiado por uma rede de dez Associações de Desenvolvimento do Cobre (CDAs) no Benelux, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Polônia, Escandinávia, Espanha e o Reino Unido. Fomenta os esforços empreendidos inicialmente pela Associação de Desenvolvimento de Produtos de Cobre, criada em 1959, e a INCRA (Associação Internacional de Pesquisa do Cobre) formada em 1961.

Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE

É uma instituição sem fins lucrativos, constituída por empresas produtoras e transformadoras de cobre com a missão de estimular o uso técnico e econômico do metal, promovendo sua utilização correta e eficiente. Desenvolve projetos nas várias áreas de aplicação do metal, divulgando as vantagens da utilização do cobre na energia elétrica, nas instalações hidráulicas e de gás, na arquitetura, no design e decoração de interiores, na saúde e muitas outras.

Reconhecimentos

Este projeto foi realizado com o apoio da Comunidade Européia e da International Copper Association, Ltd.

Advertência

O European Copper Institute, a Copper Development Association, a Claude Lyons Ltd. e o Instituto Brasileiro do Cobre, negam responsabilidade por qualquer dano direto, indireto, conseqüente ou incidental que possa resultar do uso da informação, ou da inabilidade para usar as informações ou dados contidos nesta publicação.

Copyright© European Copper Institute, Copper Development Association and Claude Lyons Ltd.

A reprodução é autorizada com a condição de que o material não seja abreviado e a fonte seja reconhecida.



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128-cj.203
Cep 01451-903
São Paulo - SP
Brasil

Tel./Fax: 55 11 3816-6383
e-mail: procobrebrasil@copper.org
Internet: www.procobre.org



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org

Afundamentos de Tensão

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

A maior parte dos afundamentos de tensão no sistema de alimentação mantém uma tensão significativa, de forma que parte da energia está ainda disponível, mas numa tensão muito baixa para ser útil para a carga. Esta seção discute os equipamentos de mitigação que lidam com este tipo de afundamentos de tensão. Não requerem nenhum mecanismo de armazenamento de energia, já que recuperam o nível de tensão necessário a partir da energia ainda disponível, em tensão reduzida (e corrente aumentada) durante o afundamento. Estes dispositivos são geralmente conhecidos como estabilizadores automáticos de tensão. Existem outros tipos de equipamentos disponíveis para lidar com afundamentos onde a tensão retida é zero, e que são descritos em outra seção deste Guia.

Esta seção fornece uma descrição básica de cada tipo de estabilizador automático de tensão. As vantagens e desvantagens de cada tipo foram listadas para permitir a escolha apropriada do estabilizador de tensão mais adequado para cada aplicação em particular.

Os principais tipos de estabilizadores automáticos de tensão são os seguintes:

- eletromecânicos;
- transformadores ferro-ressonantes ou de tensão constante (CVT, do inglês Constant Voltage Transformer);
- reguladores eletrônicos por degraus;
- reatores saturáveis (transdutores);
- estabilizador eletrônico de tensão (EVS, do inglês Electronic Voltage Stabilisers).

Um ponto importante a considerar na seleção de um estabilizador automático de tensão é que a solução escolhida deve resolver o problema em particular sem criar problemas adicionais. Um exemplo disto seria conectar um estabilizador ferro-ressonante na saída de um gerador inferior para reduzir as variações de tensão. O resultado líquido seria afetado negativamente pelas flutuações de frequência do gerador inferior que produziria uma variação de tensão CA de 1,5% para cada 1% de variação de frequência.

A seguir é apresentada uma descrição detalhada de cada tipo de estabilizador automático de tensão:

Eletromecânico

O princípio deste tipo de estabilizador é controlar automaticamente um transformador variável interno para compensar pela variação da tensão de entrada da fonte de alimentação CA. A saída do transformador variável alimenta o

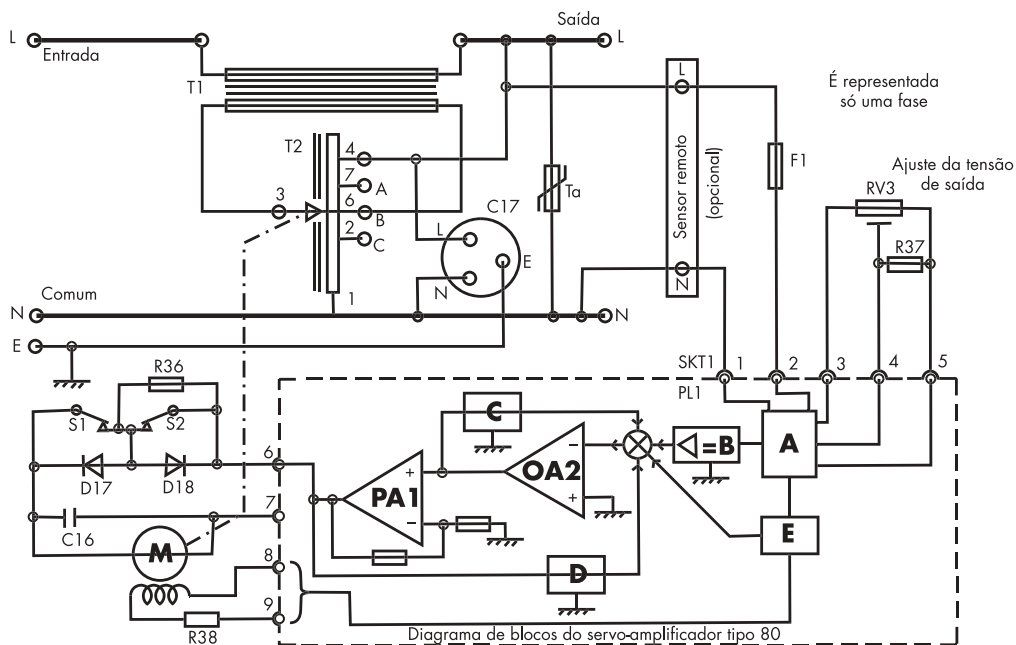


Figura 1 - Diagrama do circuito básico de regulador de tensão eletromecânico.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

enrolamento primário de um transformador elevador/abaixador (buck/boost), cujo secundário é conectado em série entre a alimentação e a carga para injetar uma tensão de correção, a favor ou oposta, na linha de alimentação, como mostrado na Figura 1.

Uma das principais vantagens deste tipo de estabilizador é que a potência real controlada é apenas uma proporção pequena da potência total da carga. Por exemplo, para controlar uma carga de 100 kVA numa faixa de tensão de alimentação de $\pm 10\%$, o estabilizador de tensão eletromecânico precisaria lidar apenas com um máximo de 10 kVA de potência. A natureza elétrica do caminho da potência determina que a eficiência seja tipicamente 98% a plena carga. Mesmo com cargas leves, digamos de 10% do máximo, a eficiência é ainda maior que 95%.

A tensão de saída do estabilizador eletromecânico é monitorada por um servo-amplificador. Se a tensão de saída estabilizada se desvia do valor pré-fixado devido a uma mudança na tensão de alimentação ou na carga real, o servo-amplificador acionará um motor que fará girar o braço de escovas do transformador variável na direção requerida para

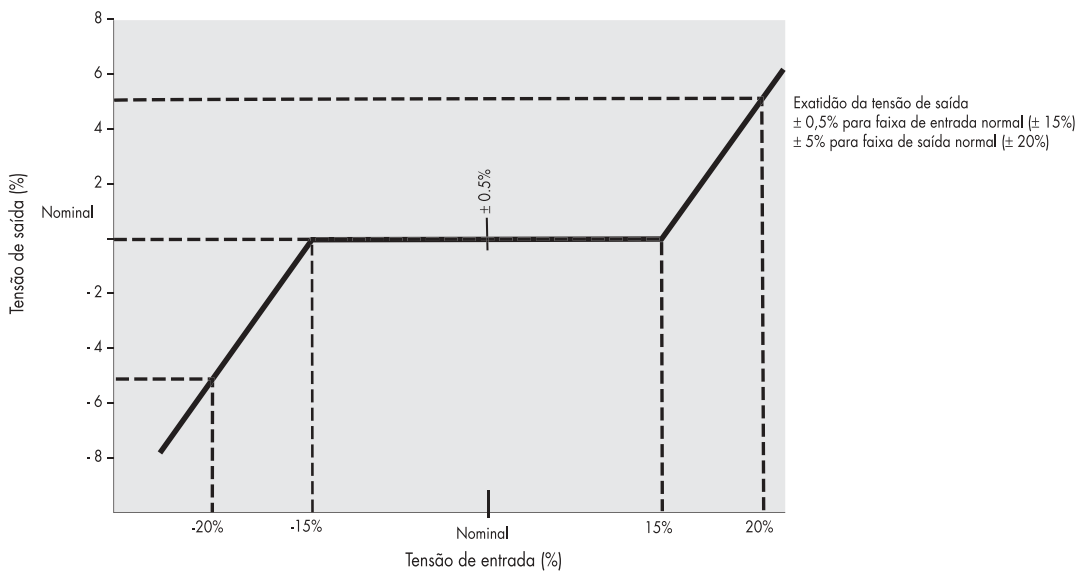


Figura 2 - Características de entrada/saída para um estabilizador $\pm 15\%$.

e elevar ou abaixar a tensão de alimentação de entrada até que é restabelecido o valor correto pré-fixado de tensão de saída. Este método de estabilização de tensão não produz harmônicas e, portanto, não injeta distorções na tensão de entrada. A Figura 2 mostra que a faixa de entrada pode ser ultrapassada desde que o aumento do desvio da tensão possa ser aceito.

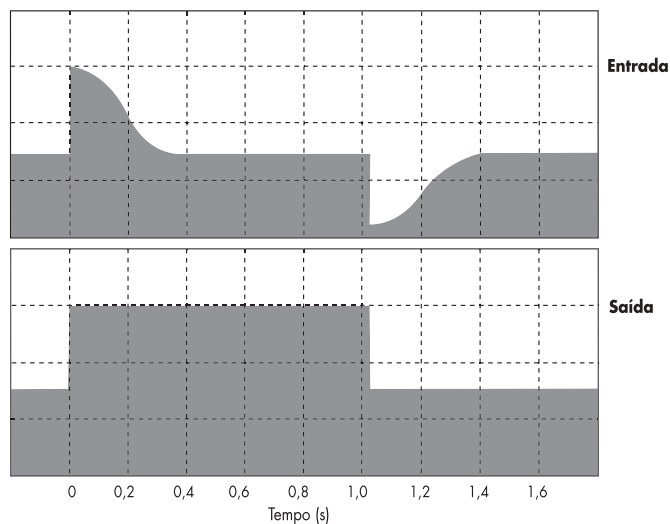


Figura 3 - Oscilograma mostrando o tempo típico de correção de um estabilizador de tensão para um degrau de 40 V.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

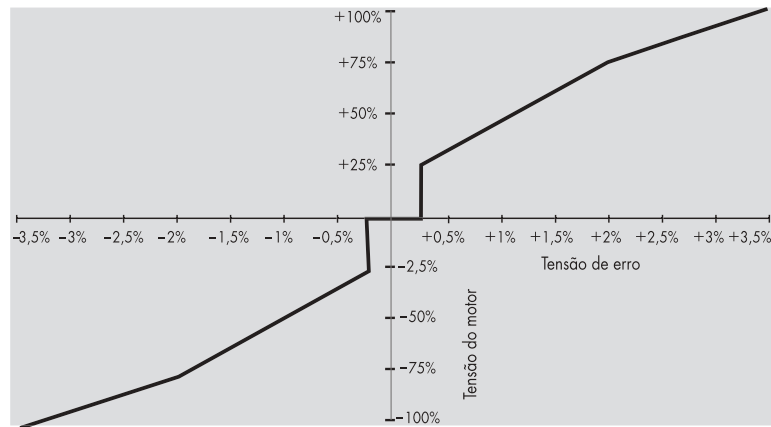


Figura 4 - A relação entre tensão de erro e tensão do motor - servo - amplificador tipo 80.

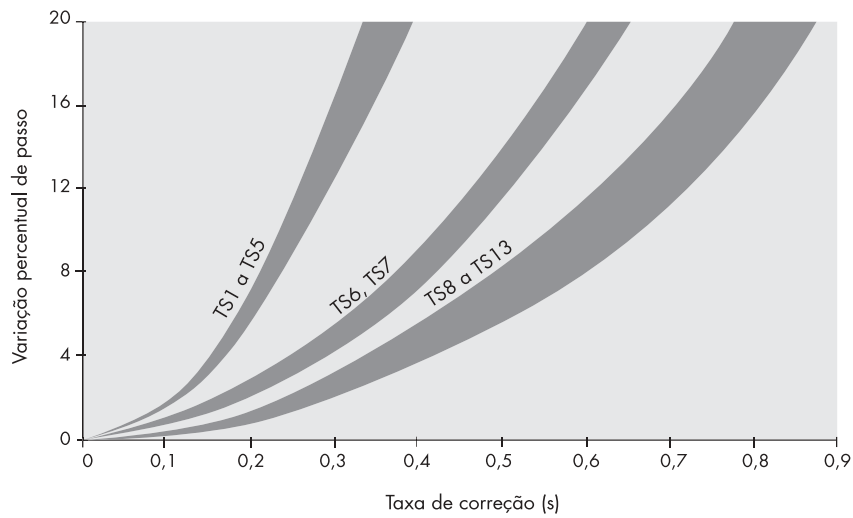


Figura 5 - Proporções de correção típicas com relação à variação percentual de passo - servo-amplificador tipo 80.

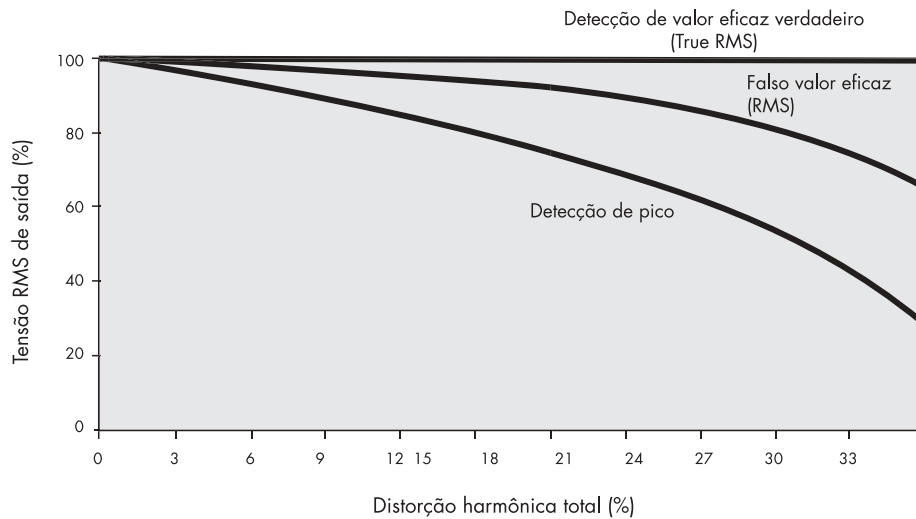


Figura 6 - Tensão RMS de saída em função da distorção harmônica total (%) - servo-amplificador tipo 80.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

A ação do servo-sistema é excepcionalmente rápida com desaceleração controlada resultante da passagem rápida por zero (Figuras 3, 4 e 5). A detecção da tensão compensa automaticamente qualquer variação da corrente de carga. As instalações de detecção remota, que possibilitam que a tensão seja detectada num ponto externo, permitem efetuar a correção das quedas de tensão nos cabos quando a carga está a alguma distância do estabilizador.

As vantagens principais do estabilizador de tensão eletromecânico são as seguintes:

- ♦ projeto simples;
- ♦ a tensão de saída é insensível ao fator de potência da carga;
- ♦ a tensão de saída compensa automaticamente as variações de carga;
- ♦ impedância de saída muito baixa;
- ♦ alta precisão de estabilização, tipicamente $\pm 0,5\%$;
- ♦ completamente insensível à frequência da alimentação;
- ♦ custo e tamanho relativamente baixos;
- ♦ controle suave sem degraus;
- ♦ a saída é insensível à distorção da alimentação (True RMS - ver Figura 6);
- ♦ campos magnéticos externos muito baixos (não existem correntes magnéticas em saturação).

As principais desvantagens do estabilizador de tensão eletromagnético são as seguintes:

- ♦ o estabilizador tem partes móveis;
- ♦ o tempo de resposta é tipicamente 15 ciclos (300 ms) para uma variação de 40 V. É mais lento que um regulador por degraú eletrônico ou um estabilizador ferro-ressonante estático (CVT).

Regulador ferro-ressonante ou transformador de tensão constante

O circuito básico de um transformador de tensão constante (CVT, do inglês Constant Voltage Transformer) é mostrado na Figura 7 e consiste em um transformador com um único enrolamento primário e três enrolamentos secundários, junto com um único capacitor em derivação (shunt).

O enrolamento de neutralização (N) e o enrolamento secundário (S) estão separados do enrolamento por shunts magnéticos. A relutância magnética destas shunts é muito alta comparada com a relutância magnética da parte central do núcleo do transformador. A indutância de fuga produzida por estes shunts, junto com o capacitor (CR), produz um circuito ressonante.

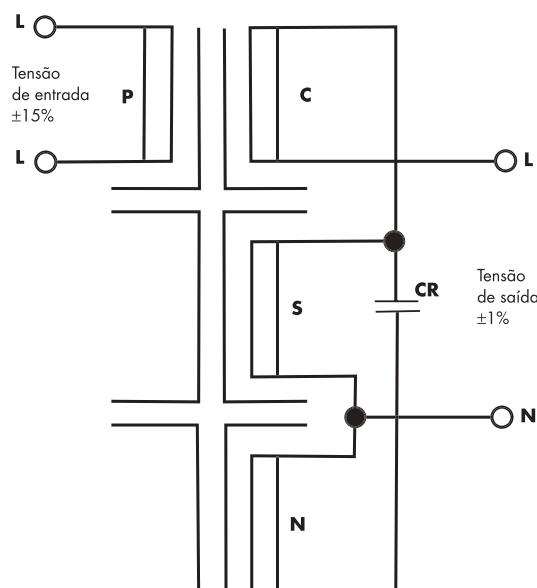


Figura 7 - Circuito básico de um CVT.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

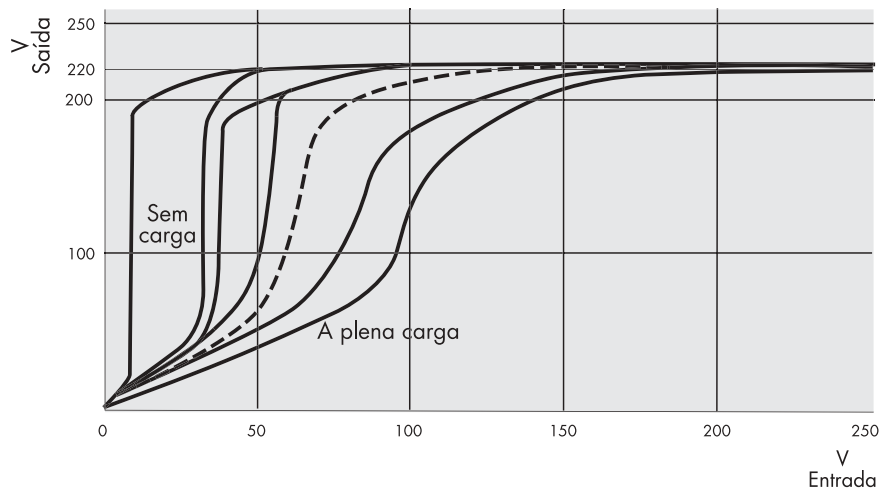


Figura 8 - Características de entrada/saída de um CVT.

Conforme a tensão de entrada aumenta, o fluxo na parte central do núcleo do transformador também aumenta, até que a reatância indutiva do enrolamento secundário é igual à reatância do capacitor. Neste momento, a tensão de entrada é alta devido à ressonância do circuito, embora a tensão de entrada é bastante baixa (Figura 8). O enrolamento de neutralização reduz a distorção da saída de cerca de 20% para menos de 3%.

O circuito secundário total é ressonante na terceira harmônica. Isto elimina a maior parte das harmônicas geradas pela saturação do núcleo e produz uma onda senoidal razoavelmente limpa.

A estabilidade da saída é determinada pelo fluxo no núcleo do transformador e a tensão gerada pelo enrolamento de compensação (C). Isto significa que a tensão de saída só pode ser mudada se existem derivações (tapes) no transformador.

As principais vantagens do estabilizador ferro-ressonante (CVT) são as seguintes:

- ♦ a capacidade de possuir uma faixa de entrada excepcionalmente larga com cargas baixas. Com 25% da carga a saída é mantida em $\pm 5\%$, até mesmo quando a tensão de entrada é apenas 35% da tensão nominal (Figura 8);
- ♦ a saída do CVT limitará automaticamente a corrente em uma situação de sobrecarga.

As principais desvantagens do estabilizador ferro-ressonante (CVT) são as seguintes:

- ♦ a característica de limitar automaticamente a corrente de saída (ver acima) pode impedir a operação correta de cargas que requerem correntes de partida elevadas, a menos que o CVT tenha sua capacidade nominal diminuída ou seja projetado especificamente para a aplicação. Exemplos típicos incluem as cargas de motores e as fontes de alimentação do modo chaveado;
- ♦ o transformador depende da ressonância e portanto a tensão de saída variará em 1,5% para cada 1% de variação na frequência de entrada;
- ♦ o CVT tem uma precisão de estabilização modesta, tipicamente $\pm 3\%$;
- ♦ o núcleo do transformador depende da saturação para alcançar a tensão de saída constante. Isto também produz campos magnéticos muito altos em torno do transformador que podem causar problemas nos equipamentos sensíveis localizados perto do CVT;
- ♦ o tamanho e peso para uma determinada potência nominal em kVA, podem ser muitas vezes maiores que os de um estabilizador de tensão eletromagnético automático da mesma capacidade nominal.

Regulador eletrônico por degrau (computador de derivações)

Os reguladores eletrônicos por degrau operam selecionando diferentes derivações na entrada ou na saída de um autotransformador (Figura 9). Esta seleção de derivações pode ser executada por meio de relés ou por um dispositivo semicondutor tal como um tiristor. Se são usados relés, eles só operam na ocorrência de uma mudança de derivação.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

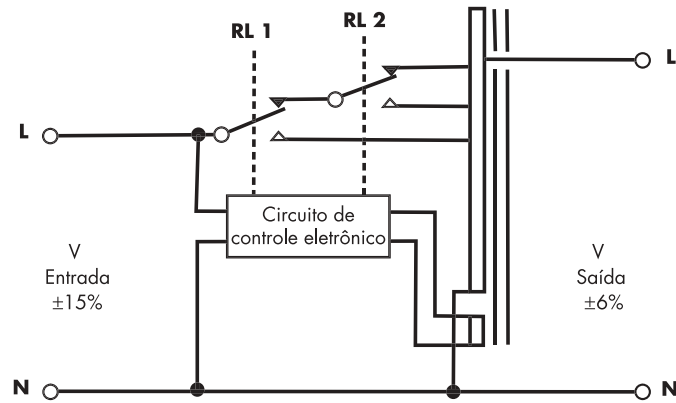


Figura 9 - Circuito básico de um regulador por degraus.

Entretanto, se é usado um tiristor, operará 50 vezes por segundo, isto é, ligará e desligará a cada ciclo da alimentação 50 Hz. Nesta aplicação, os relés têm provado que são mais confiáveis.

As variações na alimentação de tensão de entrada são monitoradas por um sensor eletrônico que por sua vez seleciona automaticamente a derivação apropriada no transformador usando um relé, mantendo assim a tensão de saída requerida.

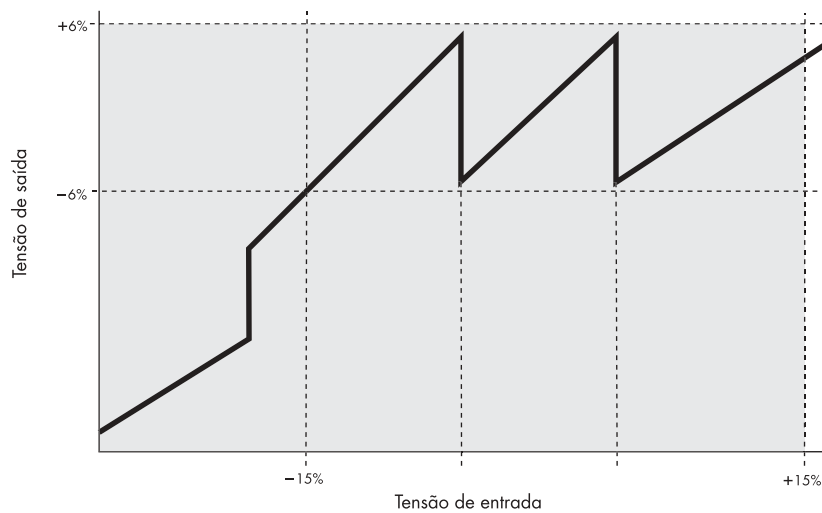


Figura 10 - Características de entrada/saída de um regulador por degraus.

O instante da comutação de derivação, graças ao circuito eletrônico, acontece em fase nas proximidades da passagem por zero da tensão de alimentação, assegurando assim que qualquer interferência de RF, ou transientes de chaveamento, sejam reduzidos ao mínimo. A tensão de saída muda em degraus (Figura 10). Portanto, este tipo de estabilização de tensão não deve ser utilizado em cargas de iluminação ou outras cargas que não podem aceitar mudanças por degraus nas tensões de entrada.

As principais vantagens do regulador eletrônico por degrau são as seguintes:

- ♦ eficiência muito alta;
- ♦ não é sensível às mudanças de frequência;
- ♦ tamanho e peso pequenos;
- ♦ insensível ao fator de potência da carga;
- ♦ insensível às mudanças de carga;
- ♦ resposta rápida, tipicamente de 1 a 1,5 ciclos (20 a 30 ms);
- ♦ custo relativamente baixo.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

As principais desvantagens do regulador eletrônico por degrau são as seguintes:

- ♦ a regulação de tensão (estabilização) é em degraus;
- ♦ a tolerância da tensão de saída normalmente não é inferior a $\pm 3\%$;
- ♦ a confiabilidade pode ficar limitada quando são usados dispositivos semicondutores para comutar a corrente de carga.

Reator saturável (transdutor)

O estabilizador do tipo reator saturável opera gerando uma mudança de derivação controlada magneticamente produzida por um conjunto transdutor duplo (T1-T2 na Figura 11). Um circuito de controle eletrônico detecta a tensão de saída e

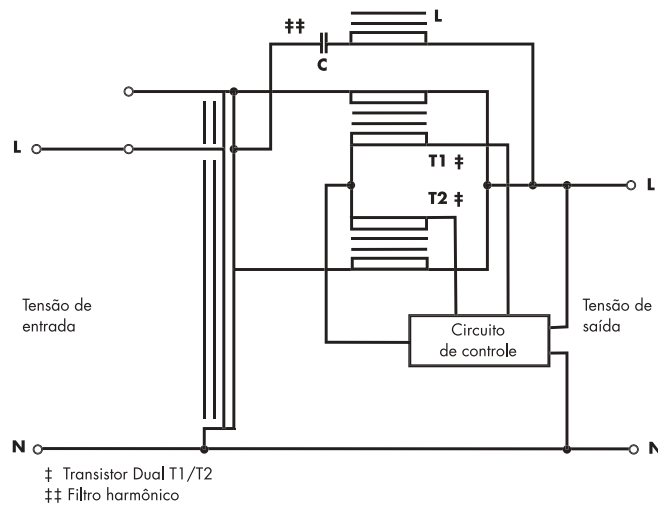


Figura 11 - Circuito de um regulador de reator saturável.

ajusta os enrolamentos de controle de T1 e T2 para corrigir qualquer erro. A saturação dos transdutores produz distorção que tem que ser removida com filtros para assegurar que é obtida uma boa onda senoidal.

Embora o reator saturável não tenha partes móveis, seu tempo de correção pode ser lento, da ordem de 20 ciclos (400 ms) devido à indutância dos transdutores. É, portanto, muito mais lento que um estabilizador eletromecânico comparável.

As vantagens principais do reator saturável são as seguintes:

- ♦ em partes móveis;
- ♦ controle suave sem degraus.

As desvantagens principais do reator saturável são as seguintes:

- ♦ tamanho e peso grandes;
- ♦ o tempo de resposta é mais lento que o de um estabilizador de tensão automático eletromecânico com capacidade semelhante;
- ♦ podem ser gerados grandes campos magnéticos;
- ♦ a faixa de tensão é dependente do fator de potência da carga;
- ♦ a impedância interna alta pode produzir algumas correntes de carga elevadas;
- ♦ a distorção da forma de onda de saída é dependente da frequência de alimentação;
- ♦ a precisão da saída é dependente da frequência da alimentação e do fator de potência da carga.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

Estabilizador de tensão eletrônico

O estabilizador de tensão eletrônico automático é um estabilizador de tensão muito rápido, muito tolerante, sem partes móveis e sem necessidade de comutação de derivações.

O componente principal de um estabilizador de tensão eletrônico é um controlador eletrônico de potência. Dependendo do modelo, o controlador de potência fornece uma tensão ao primário de um transformador elevador/abaixador (buck/boost transformer) que pode estar em fase ou fora de fase. O secundário do transformador elevador/abaixador é conectado entre a tensão de alimentação de entrada e a carga. O controlador de potência pode assim adicionar ou subtrair tensão da tensão de alimentação ou controlar a carga diretamente através de um autotransformador.

Tabela 1 - Comparação das técnicas de estabilização de tensão

Técnica	Faixa de entrada	Suavidade do controle	Velocidade de resposta	Precisão da estabilização	Regulagem da carga	Tamanho por kVA	Custo por kVA	Pontuação total (máx. 70)	Normalização (%)
Eletromecânico	10	10	6	10	10	9	9	64	91
Ferro-ressonante	8	8 (B)	9 (B)	5	8 (D)	3	7	48	69
Por degrau	8 (A)	6 (A)	10	5 (A)	6 (C)	10	10	55	79
Reator saturável	8	10	5	8	8 (D)	4 (E)	6	49	70
Eletrônico	10	10	10	10	10	10	8	68	97

A função do controlador eletrônico de potência é provida por dois comutadores bidirecionais baseados em IGBTs (transistores bipolares de porta isolada) que são usados para cortar a tensão de entrada numa frequência de 20 kHz com uma largura de pulso dependente da tensão de saída requerida. O controlador de potência compara a tensão de saída do estabilizador de 50 Hz com a de uma tensão de referência estável, e o erro é usado para controlar os dois comutadores bidirecionais. A onda de alta frequência modulada pela largura de pulso (PWM, do inglês Pulse Width Modulated) é então filtrada e fornecida ou ao primário do transformador elevador/abaixador onde a tensão do secundário adiciona ou subtrai uma tensão adequada para prover uma tensão de saída estável, ou diretamente para a carga através de um autotransformador.

Um circuito de by-pass integral é usado para desviar as correntes dos componentes dos IGBTs durante uma sobrecarga de saída ou um curto-circuito, protegendo assim os IGBTs e permitindo eliminar as correntes de falta pela queima dos fusíveis.

As vantagens principais do estabilizador eletrônico de tensão são as seguintes:

- ♦ precisão de estabilização muito alta;
- ♦ resposta muito rápida, tipicamente de 0,5 ciclos (10 ms);
- ♦ variações de tensão de entrada amplas sem a necessidade de comutadores de derivações;
- ♦ insensibilidade às variações de frequência da entrada;
- ♦ tamanho e peso reduzidos.

A desvantagem principal do estabilizador de tensão eletrônico é:

- ♦ mais caro que um estabilizador de tensão eletromecânico de capacidade semelhante.

A Mitigação dos Afundamentos de Tensão

Notas

Classificação: 1 – ruim 10 – excelente

(A) Depende do número de derivações. (B) Depende da carga. Pode ocorrer sobre ativação com cargas leves. (C) Depende da distorção da forma de onda e do número de derivações. (D) Depende do fator de potência e do tipo de carga (resistiva, capacitiva, indutiva). Esta técnica pode tornar-se instável se a constante de tempo da carga é semelhante à constante de tempo do estabilizador. (E) A distorção da forma de onda de saída é dependente da frequência.

A Tabela 1 mostra uma comparação das técnicas de estabilização de tensão. Pode ser visto que o estabilizador de tensão eletrônico é o método mais efetivo de regular a tensão de entrada para a alimentação de equipamento eletrônico sensível. O estabilizador de tensão automático eletromecânico tornou-se uma “referência” comprovadamente eficaz na indústria. Os limites superiores de velocidade e de capacidade de carga do estabilizador de tensão eletromecânico estão restringidos apenas pelas limitações mecânicas de controle dos transformadores variáveis usados no processo de regulagem de tensão. A relação custo-eficiência das diferentes soluções disponíveis para compensar afundamentos de tensão está muito relacionada com o valor e a sensibilidade da carga que requer uma alimentação de tensão estável e com a necessidade de evitar a introdução de problemas adicionais para o equipamento através do processo de estabilização de tensão. Embora o estabilizador de tensão eletrônico seja mais caro por kVA que o estabilizador eletromecânico e o regulador eletrônico por degrau, o futuro desenvolvimento e a disponibilidade de IGBTs de potência mais alta e sua inevitável redução de custo prenunciam um bom futuro para o estabilizador eletrônico de tensão, como o método mais rápido, mais eficiente e mais econômico de estabilização da tensão de entrada para equipamento eletrônico sensível.

Rede de Parceiros

Copper Benelux
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 7090
Fax: 00 32 2 777 7099
Email: mail@copperbenelux.org
Web: www.copperbenelux.org

Contact: Mr B Dôme

Copper Development Association
Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans AL1 1AQ
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731205
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Web: www.cda.org.uk & www.brass.org

Contact: Mrs A Vessey

Deutsches Kupferinstitut e.V
Am Bonnhof 5
D-40474 Duesseldorf
Germany

Tel: 00 49 211 4796 323
Fax: 00 49 211 4796 310
Email: sfassbinder@kupferinstitut.de
Web: www.kupferinstitut.de

Contact: Mr S Fassbinder

ECD Services
Via Cardinal Maffi 21
I-27100 Pavia
Italy

Tel: 00 39 0382 538934
Fax: 00 39 0382 308028
Email: info@ecd.it
Web: www.ecd.it

Contact: Dr A Baggini

European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Web: www.eurocopper.org

Contact: Mr H De Keulenaer

Hevrox
Schoebroekstraat 62
B-3583 Beringen
Belgium

Tel: 00 32 11 454 420
Fax: 00 32 11 454 423
Email: info@hevrox.be

Contact: Mr I Hendriks

HTW
Goebenstrasse 40
D-66117 Saarbruecken
Germany

Tel: 00 49 681 5867 279
Fax: 00 49 681 5867 302
Email: wlang@htw-saarland.de

Contact: Prof Dr W Langguth

Istituto Italiano del Rame
Via Corradino d'Ascanio 4
I-20142 Milano
Italy

Tel: 00 39 02 89301330
Fax: 00 39 02 89301513
Email: ist-rame@wirednet.it
Web: www.iir.it

Contact: Mr V Loconsolo

KU Leuven
Kasteelpark Arenberg 10
B-3001 Leuven-Heverlee
Belgium

Tel: 00 32 16 32 10 20
Fax: 00 32 16 32 19 85
Email: ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be

Contact: Prof Dr R Belmans

Polish Copper Promotion Centre SA
Pl.1 Maja 1-2
PL-50-136 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 78 12 502
Fax: 00 48 71 78 12 504
Email: pcpm@miedz.org.pl

Contact: Mr P Jurasz

TU Bergamo
Viale G Marconi 5
I-24044 Dalmine (BG)
Italy

Tel: 00 39 035 27 73 07
Fax: 00 39 035 56 27 79
Email: graziana@unibg.it

Contact: Prof R Colombi

TU Wroclaw
Wybrzeze Wyspianskiego 27
PL-50-370 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 32 80 192
Fax: 00 48 71 32 03 596
Email: i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

Contact: Prof Dr H Markiewicz



Claude Lyons Ltd
Brook Road
Waltham Cross
Herts EN8 7LR
United Kingdom

Tel: 00 44 1992 768888
Fax: 00 44 1992 788000
Email: pqm@claudelyons.co.uk
Website: www.claudelyons.co.uk

Derek Maule



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128-cj.203
Cep 01451-903
São Paulo - SP
Brasil

Tel./Fax: 55 11 3816-6383
e-mail: procobrebrasil@copper.org
Internet: www.procobre.org



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org