

## ARTIGO IV

Autor: Eng. Antonio Figueira  
 Revista Antenna Eletrônica Popular  
 Rio, 10/04/2006

## ESTABILIZADOR DE TENSÃO

Eng<sup>o</sup> Antonio Figueira  
 www.antoniofigueira.com.br

Prezados Leitores,

Nesse quarto artigo vamos estudar os sistemas estabilizadores de tensão, também será analisado o funcionamento do estabilizador controle por degrau de tensão mostrado na figura 2. O estabilizador de tensão também é denominado de regulador de tensão ou condicionador de energia. A função do estabilizador de tensão é corrigir as variações e oscilações de tensão, filtrar e ou minimizar alguns ruídos elétricos e proteger as cargas das descargas elétricas e atmosféricas.

O estabilizador de tensão tem muitas aplicações que dificilmente seria substituída por outro equipamento. Segundo os especialistas em energia, o estabilizador deverá permanecer no mercado por muitos anos. Ele tem mostrado muito eficiente nas aplicações as quais são indicadas. Outro fato que contribui para o sucesso de venda dos estabilizadores é o seu preço, que é relativamente baixo quando comparado com outros sistemas de energia.

No mercado brasileiro o usuário encontra estabilizador de tensão de uso doméstico e de uso profissional. O estabilizador de uso doméstico é do tipo monofásico, a tensão de trabalho pode ser de 120 Vca ou 220 Vca. A potência máxima dificilmente ultrapassa os 2000 VA. A faixa de correção da tensão de entrada é de  $\pm 15\%$  do valor nominal. Por exemplo, um estabilizador de 120 Vca a tensão de entrada pode variar de 102 Vca a 138 Vca que a tensão de saída será mantida em 120 Vca. O estabilizador de uso doméstico em geral não possui transformador isolador, não tem sensores de: sobrecorrente, sobretensão e subtensão. Também não tem instrumento para medir grandezas elétricas. Por isso que esse tipo de estabilizador é vendido muito barato.

O estabilizador de tensão profissional pode ser do tipo monofásico ou trifásico, o equipamento possui transformador isolador, a potência pode atingir até 1000 kva, a faixa de correção da tensão de entrada em média é de  $\pm 20\%$ . O equipamento possui sensores de tensão e corrente, instrumentos para medir grandezas elétricas com display LCD.

A estimativa que metade dos fabricantes brasileiros de estabilizadores ainda utiliza circuitos integrados discretos e ou dedicados. Mas é muito provável que até o ano de 2010 todos os estabilizadores fabricados no Brasil já são microcontrolados. Essa tecnologia permite a construção de estabilizadores mais eficientes, com boa regulação dinâmica e estática e além os equipamentos ficam compactos. A comunicação entre usuário e equipamento é via software, ele possui log de evento interno que registra todas as operações. A calibração e a monitoração do equipamento é feita via software que pode ser instalado num note book ou microcomputador.

Os projetistas de estabilizadores de tensão desenvolveram três métodos de correção, que são: o método núcleo saturado ou ferro-ressonante, o controle por fase ou controle angular e a correção por degrau de tensão ou tap changer. A partir desses três métodos foram desenvolvidas várias configurações ou derivações. É importante ressaltar que as configurações criadas até hoje sempre mantiveram a filosofia de funcionamento do método original. Pode-se dizer que o diferencial entre os fabricantes de estabilizadores é o circuito de controle.

No quadro abaixo são mostradas as características principais de cada método com seus os pontos positivos e negativos. O objetivo é orientar o usuário no momento de comprar um estabilizador de tensão.

<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MÉTODOS</b>			
CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	NÚCLEO SATURADO	CONTROLE POR FASE	CONTROLE POR DEGRAU
Regulação	Boa	Excelente	Muito boa
Resposta dinâmica	Regular	Rápida	Rápida
Faixa de regulação média	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 25\%$
Rendimento	60% a 70%	75% a 85%	98%

Fator de Potência médio	0.65	0.70	0.98
Alimenta qualquer tipo de carga	Não há restrições	Há restrições	Não há restrições
Gera distorção harmônica	Não	Sim	Não
Precisão no ajuste da tensão de saída	Excelente	Excelente	Média de $\pm 2\%$
Dissipação térmica	Elevada	Baixa	Baixa
Forma da onda senoidal de saída	Com deformação	Com deformação	Normal
Potência máxima *	20 kva	300 kva	1000 kva
* A dimensão do equipamento é um fator que limitada também à potência máxima			

A figura 3.1 mostra o esquema elétrico básico de um sistema estabilizador de tensão com correção por degrau de tensão. Na tabela 1 são mostrados o fechamento (F) e a abertura (A) das chaves que ligam e desligam os enrolamentos do autotransformador de correção. Na tabela 2 são mostrados os estados lógicos binário gerados pelo circuito de controle para aciona o fechamento e aberturas das chaves, tiristores ou relés.

Para facilitar a análise do método, os tiristores foram substituídos por chaves mecânicas manuais do tipo HH, que tem a função de ligar e desligar os enrolamentos do autotransformador (tr-2) ao secundário do transformador de correção (TR-1). No estabilizador de tensão hipotético são utilizados dois transformadores, sendo que TR-1 é o transformador de correção, cuja entrada do enrolamento primário (ponto 1) é ligado em série com a fase da rede que alimenta o estabilizador. Na saída do enrolamento primário (ponto2) é ligada a carga (RL), o enrolamento secundário é ligado no autotransformador, nos pontos D e C.

A tensão de cada enrolamento que será somado ou subtraído é determinada pelo número de espiras de cada enrolamento do autotransformador TR-2. Nesse método a quantidade mínima de enrolamentos no autotransformador é de dois, mais um tap central. Nesse caso, a faixa de correção de tensão é bastante reduzida. Em resumo, quanto maior o número de enrolamentos, maior será a faixa de estabilização. Quanto menor a tensão de cada enrolamento, menor será o incremento de degrau de tensão, e melhor será a correção da tensão. A definição do número de enrolamento do autotransformador é feita pelo projetista do equipamento, mas sempre lembrando que o aumento do número de enrolamentos implica no aumento do custo de fabricação do estabilizador. Porque isso aumentar o número de tiristores e a complexidade do circuito de controle do estabilizador.

A corrente alternada da rede ( $I_o$ ) atravessa o enrolamento primário do autotransformador e a carga. O autotransformador que também funciona como um divisor de tensão. A tensão aplicada nas extremidades de TR-2, entre os pontos A e B geram as tensões nos enrolamentos E1, E2, E3 e E4. Observa no esquema que o autotransformador (TR-2) está ligado em paralelo com a carga. O autotransformador é enrolado de forma que a corrente que o atravessa, circula em sentidos opostos, se tomar como referência o center tap (ponto 3). Por esse motivo que as tensões dos enrolamentos E1 e E2 estão em fase com a tensão do enrolamento primário do transformador de correção e as tensões dos enrolamentos E3 e E4 estão em contra-fase. Nos enrolamentos em fase os sentidos das correntes são os mesmos, e os enrolamentos em contra-fase os sentidos das correntes são contrárias.

O pino 4, enrolamento secundário do transformador de correção (TR-1) é ligado no ponto C, center tap do autotransformador (TR-2). O ponto 3 de TR-1 é ligado no lado comum das chaves liga e desliga. Para haver circulação de corrente no secundário de TR-1 uma das chaves tem que está fechada. Somente uma das chaves pode está fechada por vez. Caso ocorra o acionado de duas ou mais chaves ao mesmo tempo, esses enrolamentos ficarão em curto-circuito, e isso pode levá-los a queima.

Para melhor compreensão do método serão analisados cinco exemplos diferentes. Vamos admitir que inicialmente todas as chaves estão abertas, e os valores das tensões de incrementos dos enrolamentos E1 e E2 é de + 5.0 Vca (operação de soma), e os enrolamentos E3 e E4 é de - 5.0 Vca (operação de subtração).

A análise de funcionamento do método de correção por degrau de tensão é válida para os estabilizadores monofásicos ou trifásicos, de pequena, média e grande potência. A mesma análise também é válido para as diversas configurações que surgem a partir do método principal. É importante ressaltar que os fabricantes de estabilizadores de tensão utilizam nos seus projetos tiristor S.C.R, tiristor triac e relés para operar como chaves que ligam e desligam os enrolamentos dos reatores.

Os acionamentos das chaves eletrônicas de semicondutores e ou chaves eletromecânicas são comandadas pelo circuito de controle, esse por sua vez geram as tensões ou pulsos de disparo que realizam o acionamento das mesmas. O circuito de controle é responsável também pela monitoração das tensões alternada de entrada e de saída do estabilizador. A partir das análises das informações as chaves são acionadas, todo o processo ocorre de forma automática. O tempo de correção em média varia de um quarto

de ciclo de onda senoidal (4,16 ms) até um ciclo completo (16,66 ms). Quanto menor o tempo de correção melhor é a regulação e qualidade do estabilizador.

É importante que o leitor tenha em mente as seguintes informações: um estabilizador de tensão corrige apenas as variações que afetam o valor da tensão, em hipótese alguma, o estabilizador corrige as variações de frequência. Somente os sistemas no-breaks podem corrigir as variações de frequências. Outra informação importante é que o estabilizador de tensão não muda a forma de onda da rede que o alimenta, é bem verdade que alguns métodos distorce a forma de onda, mas sem prejuízo maiores para a carga.

De todos os métodos empregados nos projetos de estabilizadores de tensão, o método que apresenta a melhor performance em todos os aspectos é o controle por degrau de tensão. Ele não provoca distorção na forma de onda de saída e apresenta o melhor custo benefício em relação aos outros métodos. Com esse método é possível projetar e fabricar estabilizadores monofásicos e trifásicos de pequena, média e grande potência. Por isso que esse é o método mais utilizado nos projetos de estabilizadores de tensão. A partir do método controle por degrau foram desenvolvidas várias configurações, a filosofia básica do método sempre é mantida.

Na análise de funcionamento a seguir estamos utilizando o esquemático eletrônico da figura 3.1. Nesse caso a tensão de saída é ajustada para 120 Vca. O leitor deve observar que no decorrer da análise de funcionamento as operações de soma e subtração de tensão ocorrer com degrau de tensão. O valor é pré-determinado no projeto do equipamento, o projetista é quem define qual é a relação dos incrementos de tensão.

#### **Exemplo I – A tensão de saída do estabilizador está com 120 Vca.**

No caso a tensão de saída foi ajustada para 120 Vca. Vamos Admitir que nesse instante a tensão alternada da rede também está com 120 Vca, logo o circuito de controle não deve realizar nenhuma operação de soma ou subtração. O circuito de controle vai comandar o fechamento da chave CH-3, com isso o enrolamento secundário do transformador de correção (TR-1) é colocado em curto-circuito, logicamente nenhuma tensão de correção ser induzida no enrolamento primário de TR-1. A tensão de entrada passa pelo primário de TR-1 e alimenta a carga.

#### **Exemplo II - A tensão de saída do estabilizador está com 115 Vca.**

A tensão de saída abaixou para 115 Vca, isso significa que a tensão da rede sofreu uma queda de tensão de 5.0 volts. O circuito de controle atua imediatamente para corrigir a queda de tensão. Para realizar a operação de soma o circuito de controle comanda o fechamento da chave CH-2, as demais chaves ficam abertas. Com o fechamento da chave CH-2 o enrolamento E1 é ligado em série com o enrolamento secundário de TR-1. Como os dois enrolamentos estão em fase as duas tensões serão somadas, tensão da rede presente no primário de TR-1 e a tensão do enrolamento E1. Observa que nessa operação apenas CH-2 está fechada, as demais chaves estão abertas.

#### **Exemplo III - A tensão de saída do estabilizador foi para 110 Vca.**

No exemplo III a tensão da rede caiu ainda mais e foi para 110 Volts. Para compensar a queda de tensão o circuito de controle comanda a abertura da chave CH-2 e o fechamento da chave CH-1, nesse caso as tensões de E1 e E2 é somado com o enrolamento secundário de TR-1. O valor do incremento de tensão será: + 5,0 Volts do enrolamento E1 e + 5,0 Volts do enrolamento E2.

#### **Exemplo IV - A tensão de saída subiu para 125 Vca.**

No exemplo IV a tensão da rede sofreu uma elevação de tensão e foi para 125 Volts. Nesse caso o circuito de controle tem realizar uma operação de subtração de tensão. No momento que o circuito de controle percebe a elevação, ele comanda o fechamento da chave CH-4. Como o enrolamento E4 do autotransformador (TR-2) está em contra-fase com o enrolamento secundário de TR-1 imediatamente será processada uma operação de subtração eletrônica, e a tensão de saída será obrigada a retornar para o valor de ajuste de 120 Vca.

#### **Exemplo V - A tensão de saída subiu para 130 Vca.**

No exemplo V a tensão de entrada subiu para 130 Volts. Com essa nova elevação da tensão o circuito de controle vai comandar uma operação de subtração de tensão. Nesse caso a chave CH5 é fechada e o enrolamento E4 do autotransformador TR-2 é ligado em série com o enrolamento secundário do transformador de correção (TR-1). Como os enrolamentos E3 e E4 de TR-2 estão ligado em contra-fase com o enrolamento secundário de TR-1, a operação processada é uma subtração de tensão. Nesse caso a tensão de saída é obrigada a retornar para o seu valor original de 120 Vca. Nessa operação houver um decremento na tensão de saída -10 Vca, sendo -5.0 Vca de E3 e -5.0 Vca de E4.

Nota:

As operações que envolvem os enrolamentos E3 e E4 é sempre uma subtração de tensão, e as operações que envolvem os enrolamentos E1 e E2 a operação é uma soma eletrônica de tensão.

### Esquema elétrico do estabilizador método de controle por degrau

No esquemático eletrônico da figura 3 mostra o circuito de controle do estabilizador de tensão que emprega o método de correção por degrau de tensão. O transformador de amostragem e fonte (TR-1) recebe a tensão alternada da rede. No enrolamento secundário são ligados os diodos retificadores D1 e D2. O capacitor eletrolítico C1 faz a filtragem da tensão contínua pulsativa. A tensão contínua não regulada é aplicada no divisor resistivo e nos triacs. A tensão estabilizada pelo regulador Reg-1 é usada para alimentar o divisor de tensão formado pelo resistor R9 e o diodo zener Z1.

Os quatro enrolamentos do autotransformador TR-3 são usados nas operações de somas e subtrações eletrônicas. O valor da tensão de cada enrolamento é definido em projeto. O circuito de controle é responsável pela geração da lógica binária que seleciona o triac e o enrolamento que será somado ou subtraído da tensão alternada de entrada. No transformador de correção TR-1 são processadas as operações de soma e subtração eletrônica de tensão.

O circuito conversor analógico-digital é responsável pela conversão das variações da tensão alternada em sinais binários. Os drives formados pelos transistorizares (T1/T5) executam o disparo e comutação dos triacs. Os triacs por sua vez ligam e desligam os enrolamentos do autotransformador ao enrolamento secundário do transformador de correção.

O circuito conversor analógico digital é formado pelo circuito integrado LM 324 (CI-1) e pela porta lógica ou exclusiva CD 4070 (CI-2). Nas portas positivas do CI-1 é aplicada a tensão de referência de 6.2 V, regulada pelo diodo zener Z1. Os quatro circuitos operacionais do CI-1 estão polarizados para funcionar como circuitos comparadores de tensão.

O segundo divisor formado pelos resistores R1, R2, R3, P1, R4, R5, R6, R7, R8 e P2, divide a tensão contínua não regulada, e geram as tensões de referência: V1, V2, V3 e V4. Os seus valores variam em função da tensão alternada de entrada, ou seja, quando a tensão da rede sobe, a tensão sobre o divisor também sobe, e quando a tensão da rede abaixa a tensão sobre o divisor também abaixa.

O circuito integrado CI-2 tem quatro portas ou exclusivas, a sua função é converter as tensões contínuas aplicada nas suas portas de entradas em sinais binários. Na tabela V são mostrados os números binários gerados pelo circuito conversor e os respectivos valores de tensão em cada ponto do circuito de controle. Para facilitar a análise do circuito atribuímos valores hipotéticos para a tensão alternada de entrada e o valor da tensão de correção.

Nota: Para facilitar a análise, lembraremos dois assuntos importantes de eletrônica. O primeiro diz respeito ao funcionamento do circuito operacional. Quando as portas de entrada positiva e negativa do circuito operacional são alimentadas com duas tensões ou sinais alternados, a porta que estiver com o maior valor de tensão vai determinar a polaridade da tensão da porta de saída do operacional.

Por exemplo, se o circuito operacional é alimentado com uma fonte positiva (+Vcc) em relação à terra, e se a porta de entrada positiva está com o maior valor de tensão, logo a porta de saída do operacional vai assumir a tensão da fonte de +Vcc. Se caso fosse à porta negativa que tivesse com maior valor de tensão, a porta de saída do operacional ficaria com zero volt, ou seja, o valor da tensão de terra.

Quando o circuito operacional é alimentado com duas fontes de tensões, uma positivas (+Vcc) e a outra negativa (-Vcc) terão as seguintes situações. Quando a tensão aplicada na entrada positiva é a de maior valor, a tensão da porta de saída fica com a tensão da fonte + Vcc. Se a tensão na porta de entrada negativa é a de maior valor, a porta de saída do operacional fica com a tensão da fonte de -Vcc.

O segundo assunto a ser lembrado é sobre eletrônica digital, mais precisamente sobre a função lógica ou exclusiva. A tabela V mostra os estados lógicos da função no circuito de controle do esquemático da figura 3.3. Observe na tabela quando as portas de entradas recebem dois sinais iguais, a porta de saída da função ou exclusiva permanece no nível lógico baixo, zero volt. Quando são aplicados nas suas portas de entradas dois sinais de níveis diferentes, a porta de saída assume o valor de nível alto, no nosso caso é de +12 Vcc

Inicialmente vamos admitir que a tensão alternada da rede que alimenta o estabilizador está com 130 Vca. Por causa da tensão elevada na entrada do estabilizador, as tensões de referência: V1, V2, V3 e V4 também elevaram. Os seus valores ultrapassaram o valor da tensão de referência 6V2 do zener Z1. Como as tensões de: V1, V2, V3 e V4 são aplicadas nas portas de entradas negativas do CI-1 (circuitos comparadores), logo todas as portas de saídas ficam com nível lógico baixo, ou seja, zero volt. A seguir os sinais de níveis lógicos baixos são aplicados nas portas de entradas da função lógica ou exclusiva. O

resultado é que todas as portas de saída do CI-2 ficam com nível baixo. A exceção é a porta CI-2 d que recebe nas suas entradas um sinal de nível baixo do CI-1 e um sinal de nível lógico alto da fonte +12 Vcc, com esses valores a porta de saída de CI-2D é obrigada a assumir nível lógico alto. Nesse caso o transistor de drive T5 é saturado e o triac Th-5 é disparado. Com o disparo do triac Th-5 os enrolamentos E3 e E4 do autotransformador (TR-3) que são ligados em contra-fase com o enrolamento secundário do transformador de correção (TR-1). O efeito resultante é a subtração eletrônica das tensões V3 e V4, dessa forma a tensão de saída é obrigada a recuar para 110 Vca.

No segundo exemplo vamos admitir que a tensão alternada da rede sofreu uma queda de tensão em relação ao caso anterior e passou de 130 Vca para 120 Vca. Em função das mudanças de estados lógicos gerados pela nova tensão de entrada, as tensões sobre o divisor V1, V2 e V3 continuam elevadas. Os seus valores ultrapassam a tensão de referência 6V2, apenas a tensão de V4 ficou abaixo da tensão de referência 6V2, por isso que a porta de saída do CI-1D muda de estado e passa para nível lógico alto (+12 Vcc). As portas de saída dos comparadores CI-1A, CI-1B e CI-1C permanecerem com nível lógico baixo (zero volt). Nesse instante as portas de entrada do CI-2D recebem duas tensões de nível alto, a sua porta de saída vai para nível baixo (zero volts), e o transistor T5 entra no corte, esse estado provoca também o corte do triac Th-5.

Observe que as funções lógicas ou exclusivas CI-2A e CI-2B continuam recebendo do CI-1 nível lógico baixo (zero volt), e permanecem com suas saídas em nível baixo (zero volt). Nas portas de entradas da função ou-exclusiva CI-2C tem um nível lógico baixo, proveniente do comparador CI-1C e um nível lógico alto proveniente do comparador CI-1D, nesse caso a porta de saída de CI-2D vai para nível lógico alto (+12 Vcc), e o transistor T4 é saturado, isso provoca o disparo do triac Th-4. Como resultado ocorre uma operação de subtração. A tensão do enrolamento E3 do autotransformador é subtraída da tensão de entrada presente no transformador de compensação TR-1, isso obriga a tensão de saída retornar para a tensão de ajuste que é 110 Vca.

No exemplo III ocorre a normalização da tensão alternada de entrada. Nesse caso apenas as tensões de V1 e V2 continuam com seus valores acima da tensão de referência 6V2. A função ou exclusiva CI-2A recebe nas suas portas de entradas duas tensões de nível lógico baixo, com isso a porta de saída continua em nível lógico baixo (zero volt). Por isso que os transistores T1 e T2 e os triacs Th-1 e Th-2 permanecem cortados.

Com a normalização da tensão alternada de entrada as tensões de V3 e V4 ficam abaixo da tensão de referência 6V2, isso vai provocar a mudança de estado na saída dos comparadores CI-1C e CI-1D que vão para nível lógico alto (+ 12 Vcc). Como as duas portas de entrada do CI-2C passam a receber duas tensões altas, a sua porta de saída assume nível lógico baixo, isso provoca o corte do transistor T4 e o bloqueio do triac TH-4.

A mudança significativa vai ocorrer no CI-2B que vai receber nas suas portas de entrada duas tensões diferentes. A primeira tensão é oriunda da porta de saída do comparador CI-1C e a segunda tensão de nível lógico alto vem da porta de saída do CI-1B. Nesse caso a porta de saída do comparador CI-2B vai para nível lógico alto, isso provoca a saturação do transistor T3 e o disparo do triac Th-3. O disparo do triac Th-3 coloca em curto-circuito o enrolamento secundário do transformador de correção, por isso nenhuma tensão será induzida no primário de TR-1, e a tensão de saída permanece em 110 Vca.

No exemplo IV a tensão alternada da rede sofreu uma queda de tensão e foi para 100 Vca. Em função da queda de tensão apenas a tensão de V1 continua com seu valor acima da tensão de referência 6V2. Na porta de entrada da função ou-exclusiva CI-2A são aplicadas duas tensões diferentes, uma tensão baixa oriunda da porta de saída do comparador CI-1A e uma tensão alta que oriunda da saída do comparador CI-1B. Nesse caso a porta de saída de CI-2A assume um nível lógico alto (+12 Vcc), e o transistor T2 é saturado e provoca o disparo do triac Th-2. Por isso que a tensão do enrolamento E1 do autotransformador é somada com a tensão do enrolamento secundário do transformador de correção e a tensão de saída retorna para o valor de 110 Vca.

No Exemplo V a tensão alternada da rede caiu para 90 Vca. Em função dessa queda acentuada de tensão, as tensões de V1, V2, V3 e V4 ficam abaixo da tensão de referência 6V2. Todas as portas de saída dos comparadores do CI-1 ficam com nível lógico alto (+12 Vcc), e são aplicadas nas portas de entradas do CI-2, por isso que todas as suas portas saídas assumem nível lógico baixo (zero volt). Devido à tensão de +12 Vcc na saída do CI-1, o transistor T1 é saturado e o triac Th-1 é disparado. As tensões dos enrolamentos E1 e E2 são somadas a tensão do enrolamento secundário do transformador de correção. O resultado é a correção da tensão de saída que retorna para o seu valor de ajuste 110 Vca.

O circuito de controle possui dois ajustes. No trimpot P1 é ajustada à tensão de saída e no trimpot P2 é ajustada à tensão de referência. Observe que o estabilizador é projetado para executar duas operações de somas e duas operações de subtrações. Os resistores R29, R30, R31, R32 e R33 são usados para limitar a corrente nos triacs.

É possível aumentar a faixa de correção do estabilizador e diminuir os degraus de tensão, para isso é preciso aumentar o número de enrolamentos do autotransformador. No circuito de controle é preciso aumentar a quantidade de circuitos comparadores, e na mesma proporção aumentar o número de funções ou-exclusivas para aumento o circuito conversor.

