

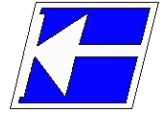
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO TÉCNICO INTEGRADO DE ELETRÔNICA

Eletrônica de Potência



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -

OPERAÇÃO DE CONVERSORES EM MALHA FECHADA

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, setembro de 2020.

OPERAÇÃO DE CONVERSORES EM MALHA FECHADA

Objetivo de Aprendizagem

Estudar a operação de conversores em malha fechada.

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios da operação em malha fechada;
- Identificar técnicas de controle de conversores;
- Entender as funcionalidades dos conversores em malha fechada.

Capítulos e aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado ao capítulo 18 da apostila e com a aula 18 disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 07 – Projeto de elementos magnéticos.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será continuar o estudo dos conteúdos transversais, como circuitos integrados para conversores estáticos, dentre outros.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou ler os capítulos da apostila da disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Eletrônica de Potência I – 2020/1. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- Capítulos da apostila de eletrônica de potência, disponível em www.ProfessorPetry.com.br.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 18);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulo 18).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
OPERAÇÃO DE CONVERSORES EM MALHA
FCHADA

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conteúdos transversais do curso, isto é, aqueles conteúdos que são aplicados a todos os grupos de conversores estudados, sejam ca-cc, cc-cc, cc-ca ou ca-ca. Assim, o objetivo aqui será realizar uma introdução à operação dos conversores em malha fechada.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Operação em malha fechada;
- Técnicas de controle.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever com suas palavras o que é e quais as implicações da operação de conversores em malha fechada;
- Descrever algumas técnicas de controle de conversores;
- Aplicar técnicas de controle simples.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em solicitar que o estudante descreva técnicas de controle simples aplicadas na operação em malha fechada de conversores estáticos.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar as diferenças entre operação em malha aberta e malha fechada de conversores;
2. Citar técnicas de controle;
3. Aplicar técnicas de controle simples nos conversores estáticos;
4. Descrever os impactos na operação de um conversor quando se utiliza técnicas de controle específicas.

2 Operação em Malha Fechada

2.1 Introdução

A operação em malha fechada dos conversores, em geral, tem o objetivo de se obter na saída o controle de alguma variável de interesse, sendo na maioria das vezes a tensão de saída ou a corrente de saída do conversor. Assim, o uso de conversores em malha aberta também pode ocorrer, mas não predomina nas aplicações de eletrônica de potência.

As aplicações de conversores são muito diversas e em sua maioria se utiliza a operação em malha fechada, visando o controle da(s) variável(veis) de interesse. Assim, em sistemas de aquecimento pode-se desejar manter uma temperatura constante, o que poderá ser feito por meio do controle da tensão sobre os elementos resistivos, por exemplo. Em sistemas de iluminação pode-se desejar manter o nível de luminosidade fixo, podendo ser feito por meio do controle da corrente aplicada no conjunto de iluminação com LED, por exemplo. Em veículos elétricos pode-se desejar manter a velocidade constante, podendo-se controlar a tensão e corrente aplicadas nos motores elétricos, por exemplo.

Assim, neste capítulo será realizada um breve estudo sobre a operação dos conversores em malha fechada, podendo ser aplicado aos quatro grupos de conversores estudados, que são os conversores ca-cc, cc-cc, cc-ca e ca-ca.

2.2 Objetivos do controle em malha fechada

Em síntese, os objetivos do controle em malha fechada são:

- Garantir a precisão no ajuste da variável de saída;
- Rápida correção de eventuais desvios provenientes de transitórios na alimentação ou mudanças na carga.

2.3 Características da operação em malha aberta versus malha fechada

Entre as principais características da operação em malha aberta se tem:

- Circuito simples;
- Geralmente sem problemas de estabilidade;
- Erros estáticos (de regime) grande;
- Respostas transitórias com sobressinal;
- Projeto simples;
- Conformação de sinais complicada.

Por sua vez, na operação de conversores em malha fechada se tem:

- Circuitos mais complexos;
- Podem apresentar problemas de estabilidade;
- Erros estáticos praticamente nulos;
- Melhora da resposta transitória;
- Projeto complexo;
- Possibilidade de conformar sinais.

2.4 Principais técnicas de controle

Existem diversas técnicas de controle, dentre as mais simples e as mais complexas.

Algumas delas são listadas a seguir:

- Técnicas lineares versus não-lineares;
- Controle clássico versus controle moderno;
- Controle no domínio do tempo versus controle no domínio da frequência;
- Controle liga-desliga;
- Controle por histerese;
- Controle fuzzy;
- Controle adaptativo;
- Controle por variáveis de estado;
- Controle por modos deslizantes;
- Dentre outros.

Algumas técnicas são mais simples de serem implementadas, como por exemplo o controle liga-desliga e o controle por histerese, enquanto outras técnicas são mais complexas. Do mesmo modo, algumas técnicas possuem uma abordagem matemática simples, enquanto outras envolvem cálculos complexos e dispendiosos.

2.1 Sistema de controle em malha fechada

A Figura 1 mostra um conversor cc-cc Buck com os blocos de circuitos para operação em malha fechada. Note que neste caso se tem os estágios de medição e controle, que não estariam presentes em um conversor para operação em malha aberta. No exemplo da figura, está sendo medida a tensão de saída do conversor, que será comparada com uma referência, e a partir do sinal de erro faz-se a compensação deste, gerando por fim a tensão de controle que será aplicada na modulação PWM, por exemplo.

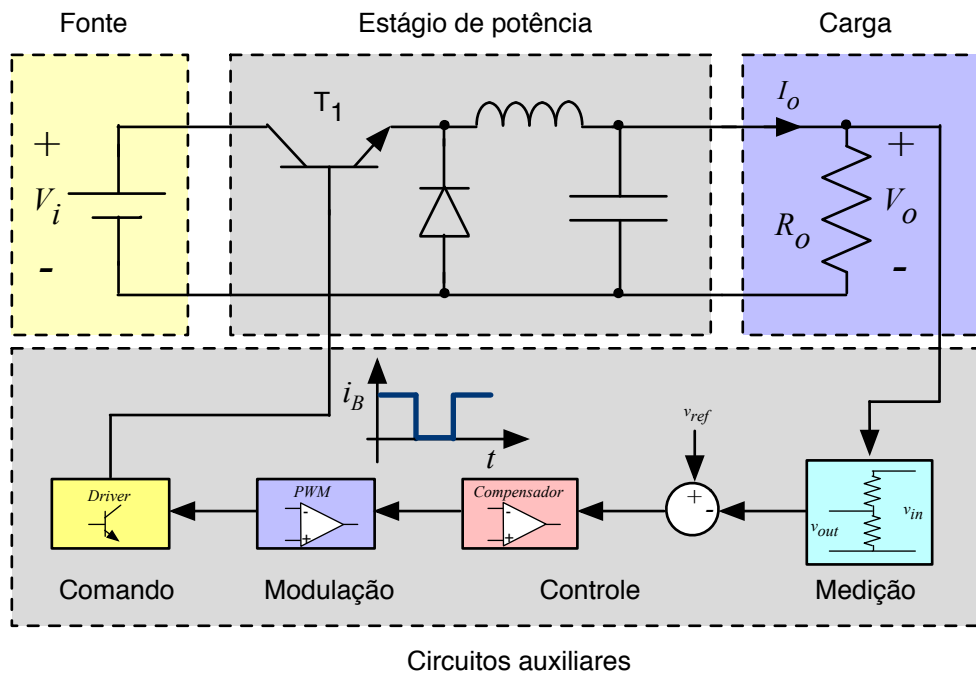


Figura 1 – Esquemático de um conversor para operação em malha fechada.

Fonte: Adaptado de Fonte: (Erickson, 1997).

A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controle para operação em malha fechada. Este sistema é simplificado, pois mostram-se apenas as etapas de geração do sinal de erro e sua compensação pelo bloco denominado de compensador, originando a tensão de controle que é aplicada no modulador. Já a Figura 3 mostra um sistema completo, que possui os seguintes elementos:

- Tensão de controle – variável de interesse e controlada no sistema em malha fechada;
- Referência – valor desejado para a variável controlada;
- Tensão medida – valor realimentado a partir da variável de interesse, ou seja, da tensão controlada;
- Erro – diferença entre o valor desejado e o valor real na variável controlada;
- Compensador – elemento responsável pelo processamento do sinal de erro, visando se obter a tensão de controle correta que fará com que a variável controlada seja levada ao valor correto. Em um conversor estático operando com modulação PWM, significa que o compensador deverá gerar a tensão de controle adequada, que aplicada ao modulador, irá originar a razão cíclica (D) correta, para que a tensão na saída seja igual ao valor de referência desejado;

- Modulador – circuito responsável por gerar a razão cíclica adequada, ou seja, o sinal de comando do interruptor, a partir da tensão de controle (modulante) e portadora;
- Planta – conversor que está sendo controlado, podendo ser qualquer conversor estudado, isolado ou não, ou outros conversores ainda não estudados até aqui;
- Perturbações – alterações no sistema que provocam alteração na variável controlada, por exemplo: alteração na tensão de entrada do conversor e alteração na carga conectada em sua saída. As perturbações não estão sendo medidas no sistema exemplo da Figura 3, mas o sistema de controle precisa corrigir a tensão de saída (variável controlada) sempre que ocorrer alguma perturbação no sistema, tornando assim a saída imune a estas alterações na planta;
- Medição – circuito responsável por realimentar a variável de interesse, podendo ser um circuito atenuador de tensão, usando divisor resistivo, ou sensores de tensão ou corrente, por exemplo.

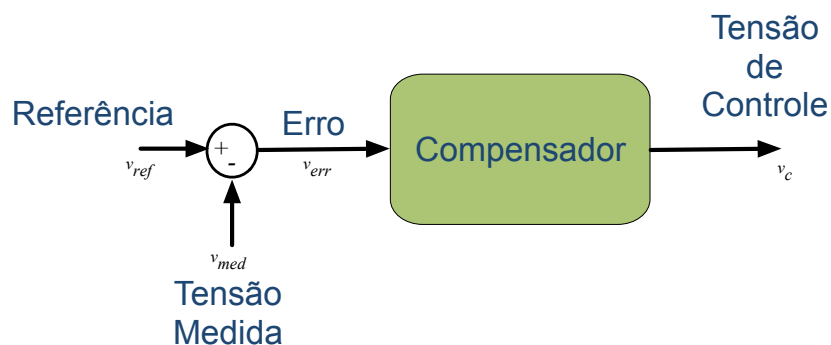


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema simplificado em malha fechada.

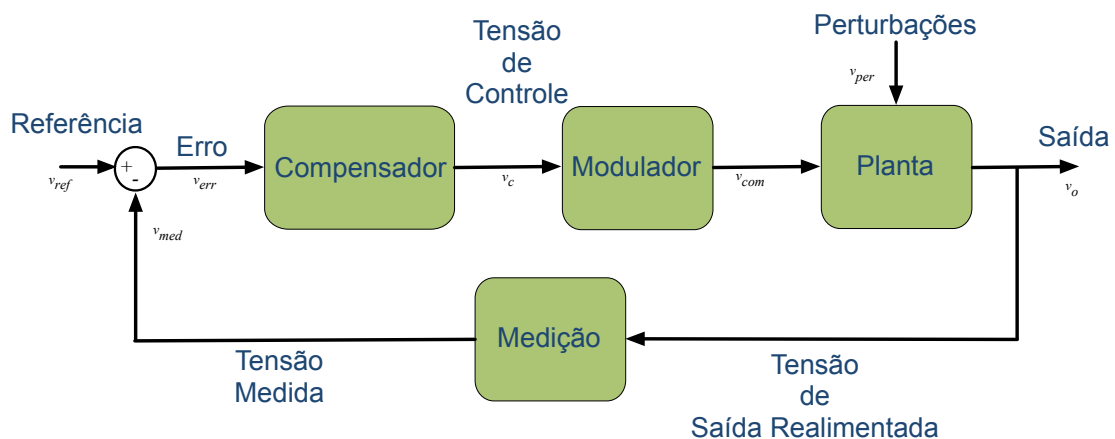


Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema completo em malha fechada.

2.1 Aspectos de um sistema de controle em malha fechada

A depender da complexidade do sistema a ser controlado e da técnica de controle utilizada, pode ser necessária a modelagem da planta, onde se entende por planta o circuito, conversor, sistema, a ser controlado. Em conversores estáticos, modelar a planta, representa obter expressões matemáticas que relacionem a variável a ser controlada pela variável de controle. Por exemplo, para um conversor cc-cc Buck operando em condução contínua, o ganho estático, que é a relação entre a tensão de saída e a razão cíclica é:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = D$$

Por sua vez, do ponto de vista do comportamento dinâmico do conversor, quando ocorrem alteração na carga, na tensão de entrada ou na razão cíclica, a relação entre a tensão de saída e a razão cíclica, no domínio da frequência, será:

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} = V_i \cdot \frac{R_o}{s^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot R_o + s \cdot L_o + R_o}$$

Onde:

$$s = j \cdot \omega$$

$$j = \sqrt{-1}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot F$$

A análise no domínio da frequência é, matematicamente, mais simples do que a análise no domínio do tempo. Note que na expressão que relaciona a tensão de saída pela razão cíclica, em termos de resposta dinâmica, se tem a influência dos elementos do filtro de saída do conversor (L_o e C_o) e da carga (R_o). Isso significa dizer que os tempos de resposta do conversor não dependerão apenas da técnica de controle e da velocidade dos componentes do circuito de controle, mas também dos componentes do estágio de potência do conversor e da frequência de comutação (F_s). Assim, para um conversor operando com frequência de comutação da ordem de 1 kHz e com indutores da ordem de mH e capacitores da ordem de μF , se terá tempos de resposta da ordem de ms, mesmo que se utilize processadores de alto desempenho no sistema de controle.

Em algumas aplicações de eletrônica de potência se utiliza a realimentação aliada com a pré-alimentação, que consiste em medir também a tensão de entrada do conversor, por exemplo.

Assim, quando ocorrerem alterações na tensão de entrada, faz-se a correção da razão cíclica de forma mais rápida do que apenas empregando a realimentação, pois neste último caso, se aguarda que a tensão de saída varie, para então realizar alguma ação de controle, enquanto na pré-alimentação se atua imediatamente quando a perturbação na entrada foi detectada (medida).

Ainda, em virtude das grandezas elétricas de um conversores apresentarem variações conforme a frequência de comutação, isto é, a corrente em um indutor de um conversor cc-cc cresce e decrece com ondulação (*ripple*) em função da frequência de comutação, pode-se utilizar valores médios para implementar o sistema de controle. Assim, ao invés de utilizar os valores instantâneos das variáveis do conversor, se utiliza valores filtrados, ou seja, a média daquela grandeza.

Em operação em malha fechada, quando se está realizando o projeto dos elementos do sistema de controle, pode-se considerar algumas características ou requisitos de projeto, por exemplo:

- Tempo de subida – tempo que o sinal leva para crescer de 10 a 90% da amplitude final;
- Tempo de retardo – tempo que o sinal leva para atingir 50% da amplitude final;
- Tempo de acomodação ou assentamento – tempo que o sinal leva para entrar em regime permanente;
- Regime transitório – intervalo de tempo em que o sinal está variando (crescendo ou decrescendo);
- Regime permanente – quando o sinal está estabilizado e não varia mais;
- Sobressinal (M_p) – amplitude que o sinal atinge acima do valor de regime permanente.

2.2 Compensadores para sistemas de controle

Os compensadores são os elementos do diagrama de blocos da Figura 3 que, a partir da tensão de erro, calculam ou determinam, a tensão de controle necessária para o conversor operar com a saída igual a referência desejada. Existem inúmeros exemplos de compensadores, sendo os mais comuns:

- Liga-desliga (on-off) (Figura 4) – controlador muito simples, que compara a variável medida com a referência fazendo com que o interruptor seja ligado ou desligado conforme a saída estiver abaixo ou acima do valor desejado. O período de comutação e velocidade de resposta dependem unicamente da dinâmica do

filtro do conversor;

- Histerese (Figura 4) – também é um sistema simples, mas que utiliza limites para definir se o interruptor deve ser ligado ou desligado; sendo que esta banda de limites é denominada de histerese. O período de comutação depende da faixa de histerese e do filtro de saída do conversor;
- Compensador proporcional (Figura 5) – representa um ganho ou uma atenuação simplesmente, denominado de K. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; este compensador apresenta erro estático em regime permanente;
- Compensador proporcional-integral (Figura 6) – representa um ganho com integração, que na prática é um efeito de memória do compensador, eliminando o erro estático em regime permanente, sendo denominado de PI. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; tem erro estático nulo em regime permanente;
- Compensador proporcional-derivativo (Figura 7) – representa um ganho com derivação, que na prática é um efeito de antecipação da tendência da variável controlada, sendo denominado de PD. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; este compensador apresenta erro estático em regime permanente, mas tem boa velocidade de resposta;
- Compensador proporcional-integral-derivativo (Figura 8) – representa um ganho com integração e derivação, sendo o controlador mais utilizado na indústria, denominado de PID. Neste caso a frequência de comutação é determinada pelo modulador; tem erro estático nulo em regime permanente e boa velocidade de resposta.

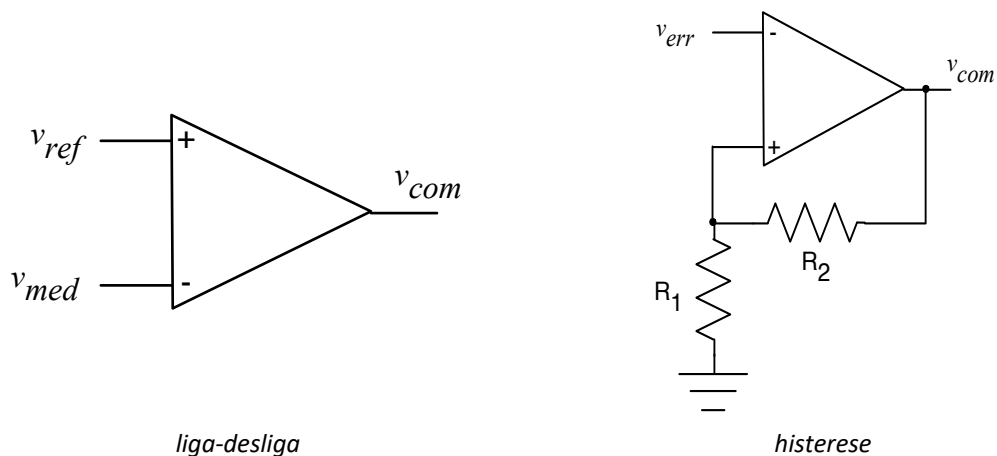


Figura 4 – Exemplos de compensadores.

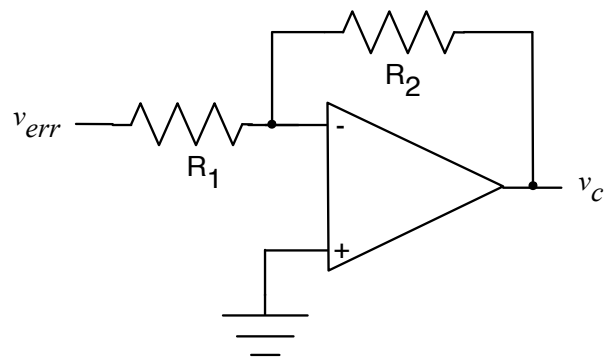
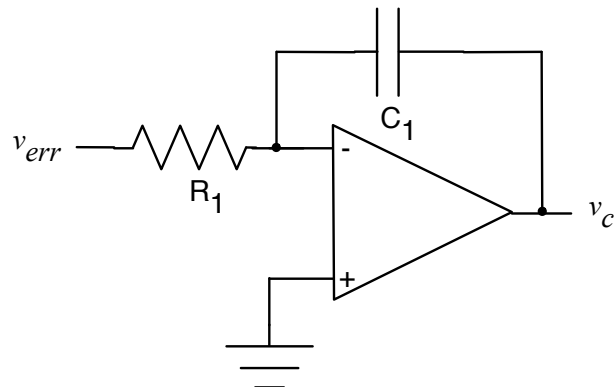
Figura 5 – Compensador proporcional (k).

Figura 6 – Compensador proporcional-integral (PI).

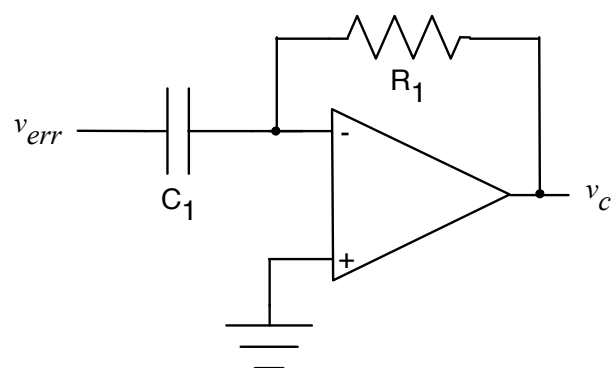


Figura 7 – Compensador proporcional-derivativo (PD).

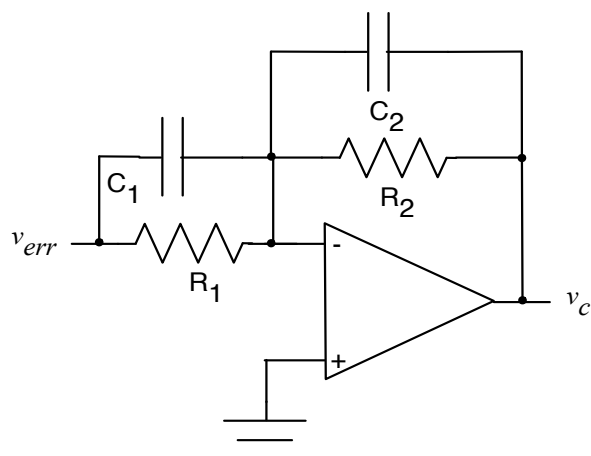


Figura 8 – Compensador proporcional-integral-derivativo (PID).

3 Técnicas de Controle

3.1 Introdução

As técnicas de controle, conforme comentado anteriormente, são as mais diversas, dentre as mais simples e as mais complexas.

A seguir serão apresentadas duas técnicas de controle simples, para que intuitivamente o leitor entenda as implicações e o comportamento do conversor quando operando em malha fechada.

3.2 Controle liga-desliga

A técnica de controle conhecida como liga-desliga (*on-off*) é simples e muito utilizada em sistemas que não exigem respostas rápidas ou que tenham dinâmicas lentas, como por exemplo em sistemas de aquecimento.

Esta técnica consiste, basicamente, em se medir a variável de interesse e se comparar com uma referência, e caso a saída esteja acima da referência, se desliga o elemento atuador, e caso a saída esteja abaixo da referência, se liga o atuador.

Em um conversor Buck cc-cc operando em condução contínua, onde a tensão de saída aumenta com o aumento da razão cíclica, se liga o interruptor para aumentar a tensão de saída e se desliga o interruptor para diminuir a tensão de saída.

A Figura 9 mostra as formas de onda aproximadas para o controle liga-desliga de um conversor estático. A tensão de saída medida é representada pela linha azul e oscila próxima da tensão de referência, que tem linha tracejada vermelha. Assim, sempre que a tensão medida estiver acima da referência, a tensão de comando, na parte inferior da figura, será baixa, representando o tempo de não condução do interruptor (t_{off}). Já quando a tensão medida estiver abaixo da referência, a tensão de comando será alta, representada pelo tempo de condução do interruptor (t_{on}).

A variação da tensão de saída do conversor tem forma de onda diferente daquela mostrada na Figura 9, pois conforme comentado anteriormente, a dinâmica do sistema dependerá os elementos do filtro, ou seja, do atraso no crescimento e decréscimo da corrente e da tensão no indutor e capacitor de filtro, respectivamente; caso se esteja estudando um conversor cc-cc, por exemplo.

Em geral, o controle liga-desliga, permite obter respostas oscilatórias do sistema, isto é, a variável controlada irá aumentar e diminuir, oscilando ao redor da referência desejada.

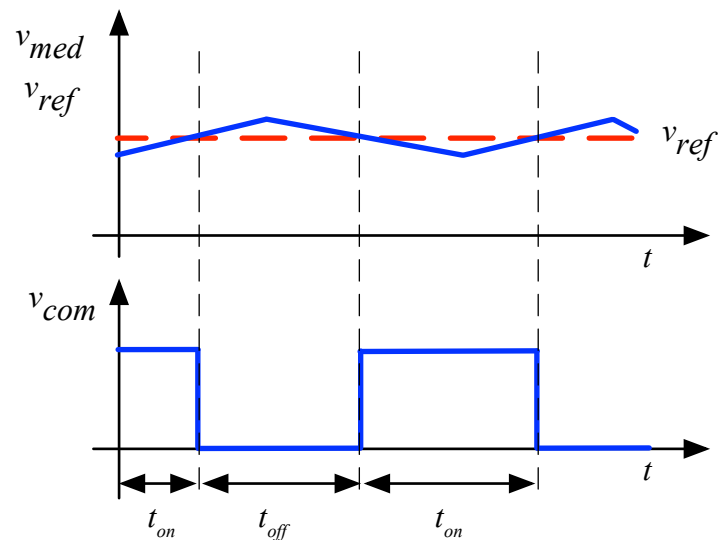


Figura 9 – Formas de onda aproximadas para controle liga-desliga.

3.1 Controle por histerese

Alterando-se o controle liga-desliga, no sentido de se ter uma dinâmica mais rápida, e um melhor controle da variável de interesse, foi desenvolvido o controle por histerese, que é semelhante ao liga-desliga, mas permite pré-determinar os limites mínimo e máximo dentre os quais a variável de interesse irá oscilar.

Assim, no controle por histerese, se compara a tensão medida do conversor, por exemplo, com os limites inferior e superior da tensão de referência, que na verdade são os limites da histerese na tensão de saída. Deste modo, quando a tensão medida for maior que o limite superior da histerese, deve-se desligar o interruptor do conversor, iniciando o tempo de não condução (t_{off}). Por outro lado, quando a tensão de saída medida ficar abaixo do limite inferior da histerese de referência, deve-se ligar o interruptor, começando o tempo de condução (t_{on}).

As formas de onda aproximadas do controle por histerese são mostradas na Figura 10, onde se notam os limites inferior e posterior da tensão de referência, representando a histerese no controle da tensão de saída. Novamente aqui as formas de onda são aproximadas, pois na prática poderão ter formatos diferentes de trechos retílineos, visto se ter a presença dos indutores e capacitores no circuito.

É importante destacar que no controle liga-desliga e no controle por histerese, não se tem o estágio de modulação no circuito, ou seja, a frequência de comutação é dada diretamente pela ação de controle. Em outras palavras, a frequência de operação do conversor poderá ir de zero até infinito. Na prática haverá um limite superior para a frequência de operação, pois os semicondutores possuem tempos de resposta finitos.

É possível realizar ajustes ou adaptações na técnica de controle por histerese para operar com frequência conhecida, dentre de limites inferiores e superiores, por exemplo. Neste caso se utiliza modulação PWM empregando o princípio geral da técnica de histerese. Assim, em um sistema analógico ou digital, quando a tensão medida ultrapassar o limite superior da histerese, ao invés de simplesmente desligar o interruptor, se realiza o decremento da razão cíclica. Do outro lado, quando a tensão medida ficar abaixo do limite inferior da histerese, ao invés de simplesmente ligar o interruptor, se aumenta gradativamente a razão cíclica.

O ajuste ou adaptação na técnica de controle por histerese, sugerido anteriormente, implica em frequência de comutação fixa, pois pode-se utilizar modulação PWM, e tempo de resposta de acordo com o incremento/decremento na razão cíclica, ficando então a critério do projetista determinar a dinâmica do conversor.

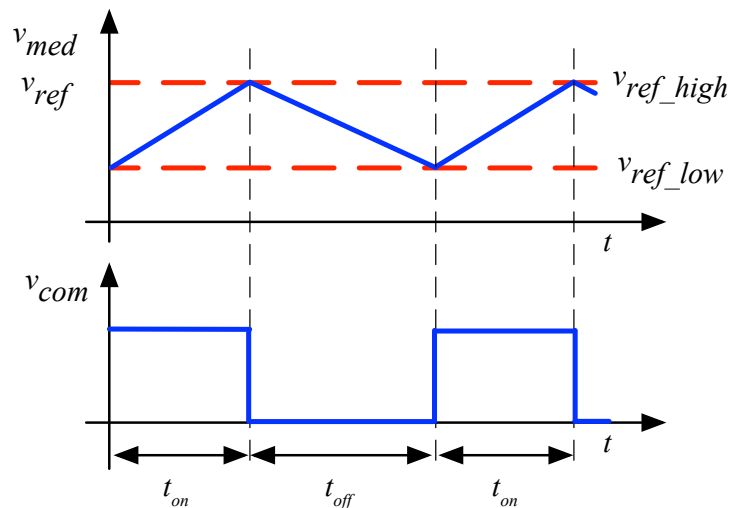


Figura 10 – Formas de onda aproximadas para controle por histerese.

4 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Comente sobre operação de conversores em malha aberta versus malha fechada.

A operação em malha aberta implica em circuitos de controle mais simples, mas com erro estático, isto é, a tensão na saída pode ser diferente da tensão efetivamente obtida. Para a obtenção em malha fechada, o erro estático pode ser pequeno ou nulo, conforme a técnica de controle utilizada, mas os circuitos são mais complexos e eventualmente podem ocorrer instabilidades no sistema, ou seja, a tensão de saída não permanece com valor fixo em regime permanente, podendo ter amplitude oscilatória, por exemplo.

ER 02. Cite duas técnicas de controle de conversores.

Controle liga-desliga e controle fuzzy.

ER 03. Comente sobre um objetivo de se operar os conversores em malha fechada.

Um dos objetivos da operação de conversores em malha fechada é a correção rápida da variável controlada, quando ocorrem perturbações, por exemplo, alteração na carga ou na tensão de entrada.

ER 04. O que é um compensador em um sistema de controle?

O compensador é o elemento do sistema de controle que a partir do sinal de erro, determina a tensão de controle, por exemplo, que possibilitará obter a tensão correta na saída em um conversor cc-cc, quando for o caso.

ER 05. Comente sobre a técnica de controle liga-desliga.

A técnica liga-desliga é muito simples e consiste em ligar o interruptor sempre que a variável controlada estiver abaixo do valor de referência e desligar o interruptor sempre que a variável controlada estiver acima do valor de referência.

Exercícios Propostos

EP 01. Comente sobre a operação de conversores em malha aberta versus operação em malha fechada.

EP 02. Cite duas características da operação de um conversor cc-cc em malha aberta.

EP 03. Cite duas características da operação de um conversor cc-cc em malha fechada.

EP 04. Cite duas técnicas de controle de conversores.

EP 05. Explique a técnica de controle por histerese.

5 Atividade Avaliativa

5.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar a mesma e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Comente sobre uma vantagem da operação de conversores em malha fechada.

AA 02. Cite duas características para a operação em malha fechada que são distintas na operação em malha aberta.

AA 03. Cite dois exemplos de controladores.

AA 04. O que é sobressinal em um sistema de controle?

AA 05. Comente sobre o controle por histerese de um conversor.

AA 01. Uma das vantagens dos conversores que operam em malha fechada é o pequeno ou até erro nulo, que significa que a variável controlada terá exatamente o valor desejado.

AA 02. A operação em malha fechada implica em circuitos mais complexos do que a operação em malha aberta; também, em termos de estabilidade, os conversores em malha aberta, em geral, são estáveis, já em malha fechada podem ocorrer instabilidades.

AA 03. Controlador proporcional e controlador proporcional-integral-derivativo.

AA 04. Sobressinal é a amplitude máxima acima do valor de referência que a variável controlada atinge quando ocorrem ações de controle no sistema.

AA 05. O controle por histerese é simples e consiste em comparar a tensão de saída, por exemplo, com um limite inferior e outro limite superior da referência. Sempre que a tensão medida ultrapassar o limite superior se abre a chave ou diminui a razão cíclica, já se a tensão medida ultrapassar o limite inferior se fecha a chave ou aumenta a razão cíclica.