Projeto e implementação de novos controladores de carga solar utilizando controle via abordagem LMI

Paulo Eduardo Menegheti Gonçalves[1], Edson Italo Mainardi Júnior[1]

[1]Instituto Federal do Mato Grosso do Sul – Três Lagoas-MS

paulo.goncalves@estudante.ifms.edu.br, edson.mainardi@ifms.edu.br

Resumo

Controladores de carga solar são largamente utilizados atualmente a fim de controlar o fluxo de energia entre a fonte geradora e a carga. Os exemplos de aplicação desse tipo de controladores vão desde sistema de conversão de energia de veículos elétricos a sistemas de controle de potência de energia solar. No entanto, a dinâmica dos controladores de carga podem ser descritas por sistemas chaveados afins, no qual pode-se incluir todas as não linearidades do sistema real. Assim, este trabalho investiga o problema de controle de sistemas chaveados afins contínuos no tempo, utilizando uma função de controle considerando as informações disponíveis da planta, a saber, tensão e corrente elétrica, como referência para o sinal de controle. O método proposto é aplicado no controle de um controlador de carga solar. O projeto do controlador é baseado em uma função quadrática de Lyapunov e Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs). Verifica-se que o projeto proposto é um procedimento de projeto mais geral, eficiente e robusto, devido ao fato do controlador proposto operar próximo ao ponto ótimo de operação do sistema. Ademais, nota-se que o método de controle é uma função de controle chaveado implementável por um microcontrolador.

Palavras-chave: Controlador de carga solar, LMIs, Sistemas chaveados.

Introdução

A tecnologia de conversão de energia contínua em energia contínua tem-se desenvolvido muito rapidamente nos últimos anos, devido principalmente a grande quantidade de aplicações industriais dos conversores CC-CC, tais como no controle de velocidade de motores de corrente contínua, fontes chaveadas de computadores, carregamento de baterias de equipamentos de comunicação, sistemas de controle de potência de energia solar, dentre outros.

De modo geral, conversores CC-CC, também conhecidos como controladores de cargas, são sistemas formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída. Este controle do fluxo de potência geralmente é efetuado ajustando-se o ciclo de trabalho da chave que opera o conversor, mais comumente conhecido como razão cíclica de operação. Desta forma, supondo uma variação na razão cíclica de operação da chave que controla o conversor, tem-se que a tensão na saída do sistema é alterada. No entanto, é preferencialmente desejado que a tensão de saída do sistema seja mantida constante, e esse fato é possível através de um controle adequado, mesmo quando ocorram alterações da tensão de entrada, carga e corrente que afetam a razão cíclica de operação da chave.

A grande motivação do uso e aperfeiçoamento das técnicas de controle para essa classe de controladores de carga é devido ao grau de eficiência na taxa de conversão que pode-se obter. Como exemplo, podemos citar a técnica clássica de controle por PWM (do inglês – Pulse Width Modulation) a qual pode chegar, geralmente, a 85% de eficiência de conversão. No entanto, controladores de carga são modelos matemáticos não-lineares e o controle clássico por PWM é efetuado com base na técnica de linearização de sistemas. Assim, este método de controle linear não assegura estabilidade do sistema para grandes variações de sinais. Desse modo, sabendo que a dinâmica dos controladores de carga podem ser descritas por sistemas chaveados afins (DECARLO et al., 2000; SUN; GE, 2005; LIBERZON; MORSE, 1999) que consideram em seu modelo todas as não linearidades do sistema, o objetivo principal deste trabalho consiste em implementar uma nova estratégia de controle considerando as informações disponíveis da planta de controle, por exemplo, tensão e corrente elétrica, como referência para o sinal de controle. O projeto do controlador é baseado em uma função quadrática de Lyapunov e Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs). Mais especificamente, propõe-se o estudo de condições suficientes, baseadas em LMIs que, quando factíveis, asseguram a estabilidade do sistema, visando assim uma melhor performance dos controladores de carga. Ademais, o método de controle resultante é uma função de controle chaveado eficientemente implementável por um microcontrolador.

Metodologia

Motivados pela ampla aplicação desta teoria em sistema práticos tais como, controladores de carga solar, que são amplamente utilizados nas indústrias, este estudo se concentra em desenvolver condições de projeto de controladores para esta classe de sistema, devendo atender a otimização do grau de eficiência na taxa de conversão. A Figura 01 a seguir ilustra de um modo geral o sistema proposto.

Figura 1. Circuito proposto.

Fonte: do autor.

Considerando essa afirmação, a proposta desse trabalho é desenvolver uma estratégia de controle eficiente para um conversor que seja capaz de propor em sua saída uma certa amplitude de tensão contínua, considerando na entrada do sistema, uma tensão constante advinda de placas fotovoltaicas.

Dessa forma, propõe-se um conversor Buck CC-CC, o qual irá captar a tensão fornecida pelas placas, efetuar a correção de seu valor e, por fim, alimentar a carga com os parâmetros desejados. A Figura 02 ilustra o modelo de um conversor Buck em operação.

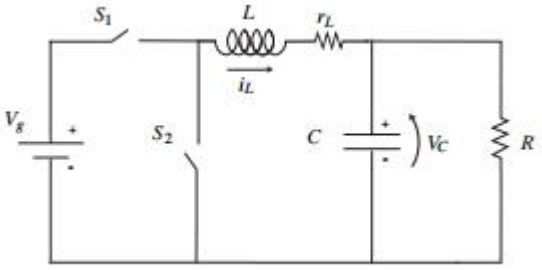

Figura 2. Conversor Buck CC-CC (Chave fechada).
Fonte: do autor.

Definindo S(t) como a chave do sistema, sendo S(t)=1 chave fechada e S(t)=0 chave aberta, tem-se a seguinte equação que define o modelo dinâmico do conversor:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L(t) \\ \dot{V}_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} + S(t) \begin{bmatrix} \frac{V_g}{L} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Onde "S(t)" representa a chave do circuito. Agora, considere o sistema chaveado afim definido pela seguinte realização no espaço de estados:

$$\dot{x} = A_{\sigma(t)}x + B_{\sigma(t)} \quad (2)$$

sendo que $x(t) \in IR^n$ é o vetor de estado e $\sigma(t)$: $t \geq 0$, é a regra de chaveamento. Para um conhecido conjunto de matrizes $A_i \in IR^{n\times n}$ e $B_i \in IR^{n\times m}$, $i = 1,\ldots,N$, tais que $A_{\sigma(t)} \in \{A_1,A_2,\ldots,A_N\}$, $B_{\sigma(t)} \in \{B_1,B_2,\ldots,B_N\}$, a regra de chaveamento $\sigma(t)$ seleciona a cada instante de tempo $t \geq 0$, um subsistema conhecido dentre os N subsistemas disponíveis.

Então, note que de (1) o sistema chaveado em espaço de estados (2) pode ser definido pelas seguintes matrizes:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -r_L/L & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} -r_L/L & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} Vg/L \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Problema 1. Suponha que o vetor de estado $x(t) \in IR^n$ é disponível para realimentação. Determine uma função $\sigma(x(t))$, para todo $t \geq 0$, tal que a estratégia de chaveamento $\sigma(t)$, torne um ponto de equilíbrio conhecido $x(t) = xr$ de (2) - (3) globalmente assintoticamente estável.

Uma solução é apresentada no Teorema 1(MAINARDI JÚNIOR, E. I., 2013), a seguir.

Teorema 1. Considere o sistema chaveado afim (2) - (3) e seja o ponto de equilíbrio $xr \in IR^n$ dado. Se existirem $\lambda \in \Lambda$ e uma matriz simétrica positiva definida $P \in IR^{n\times n}$ tais que:

$A^T_iP+PA_i < 0$, (4)

$A_\lambda xr + B_\lambda w = 0$, (5)

para todo $i \in IK$, então a estratégia de chaveamento

$\sigma(t, xr) = \arg\min_{i\in IK} (\xi(t)^T P(A_i xr + B_i)$, sendo $\xi(t) = x(t) - xr$, torna o ponto de equilíbrio $xr \in IR^n$ globalmente assintoticamente estável.

Resultados e Discussão

A fim de analisar o funcionamento da fonte chaveada proposta, considere as equações definidas anteriormente e o seguinte projeto de implementação exposto na Tabela 01.

Tabela 1. – Parâmetros do projeto.

Vi	Vo	D	R	C	L	f
24V	12V	0,67	15 Ω	10uF	2,41mH	10kHz

Através do software científico Scilab, foram inseridas as condições obtidas anteriormente, a fim de se obter, caso factível, uma matriz P solução para o problema proposto. O código obtido está a seguir:

```
////////
clear
Vin = 24; //Tensão de entrada - [A]
R = 15; //Resistência da carga - [A]
Vout = 12; //Tensão de saída na carga - [X]
L = 0.00241; //Indutância - [A] e [B]
Rl = 5.1; //Resistência parasita do Indutor - [A]
C = 0.000001; //Capacitância - [A]
f = 10000; //Frequência
D = 0.67; //Razão Cíclica
il = 0.8 //Corrente no indutor - [X]
S = 1 //Sinal digital [0;1]
//[x0]=[x;y];
//x0(t) => Derivada da matriz x
//x => di/dt
//y => dVo/dt
A = [-Rl/L , -1/L ; 1/C , -1/R*C];
//Matriz A
//[x] = [il ; Vout];
//Matriz x
B = [Vin/L ; 0];
//Matriz B
//[x0] = ( [A] * [x] ) + ( S * [B] );
//LMI
P_init=eye(A); //Condição inicial para o parâmetro [P], em que ele declara a [P] como uma matriz identidade do tamanho da matriz [A].
function [LME,LMI,OBJ]=sf_sat_eval(XLIST) //Função da para resolver a equação
[P]=XLIST(:) //Chama a matriz [P]
LME=P-P' //Linear matricial equation => igualdade matricial | [P]-[P']=0
LMI=list(P-eye(2), -(A'*P+P*A)) //Equação que deve ser resolvida pelo programa para encontrar os parâmetros corretos para P
OBJ=trace(P) //Objetivo final: Minimizar ou maximizar | Nesse caso nenhum por isso vazio
endfunction //Fim da função
[XLIST0]=(P_init);
XLIST=lmisolver(XLIST0,sf_sat_eval);
//Valores dos sitema equações do circuito
disp("O valor da matriz A é:")
disp(spec(A))
disp("O valor da matriz B é:")
disp(B)
//Valores da LMI | Essa parte é feita para que possamos conferir se os cálculos da LMI estão corretos
P=XLIST(1)
disp("O valor da LMI é:")
disp(XLIST) //O menos valor deve ser positivo
disp('Autovalores de P:')
disp(spec(P)) //O menor valor deve ser positivo
disp('Autovalores de At*P+P*A:')
disp(spec(A'*P+P*A)) //O maior valor deve ser negativo
////////
```

Após inseridos os dados no scilab, foi possível obter uma matriz P , factível e que é apresentada a seguir:

P = [0.0034031 -0.0000973; -0.0000973 0.000203]

Com essa matriz, pode-se obter o controlador desejado σ(t), o qual é implementado através de um microcontrolador arduino Mega.

```
float tensaoMedida = 0.0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR O VALOR DA TENSÃO MEDIDA PELO SENSOR
float correnteMedida = 0.0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR O VALOR DA CORRENTE MEDIDA PELO SENSOR
float Var_1 = 0.0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR O VALOR DO CONTROLADOR
float leituraSensorTensao = 0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR A LEITURA DO PINO ANALÓGICO
float leituraSensorCorrente = 0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR A LEITURA DO PINO ANALÓGICO
volatile byte state = LOW;
void setup(){
  pinMode(A2, INPUT); //DEFINE O PINO COMO ENTRADA DE TENSÃO
  pinMode(A0, INPUT); //DEFINE O PINO COMO ENTRADA DE CORRENTE
  pinMode(11, OUTPUT);//DEFINE O PINO COMO SAIDA
}
void loop(){
  leituraSensorTensao = analogRead(A2); //FAZ A LEITURA DO PINO ANALÓGICO E ARMAZENA NA VARIÁVEL O VALOR LIDO
  tensaoMedida = 0.00494*leituraSensorTensao*5.827; //VARIÁVEL RECEBE O VALOR DE TENSÃO DC MEDIDA PELO SENSOR
  leituraSensorCorrente = analogRead(A0); //FAZ A LEITURA DO PINO ANALÓGICO E ARMAZENA NA VARIÁVEL O VALOR LIDO
  correnteMedida = leituraSensorCorrente*4.882812/185; //VARIÁVEL RECEBE O VALOR DE CORRENTE DC MEDIDA PELO SENSOR
  correnteMedida = correnteMedida-13.49;
```

```
  Var_1 = 151.2473*(correnteMedida-0.8)-0.9611*(tensaoMedida-12); //VARIÁVEL RECEBE O VALOR DE PARA COMPARAÇÃO
  if (Var_1 > 0) {
  state = LOW;
    }
 else{
 state = HIGH;
   }
  digitalWrite(11, state);
}
```

A Figura 03 a seguir ilustra o início da montagem do protótipo.

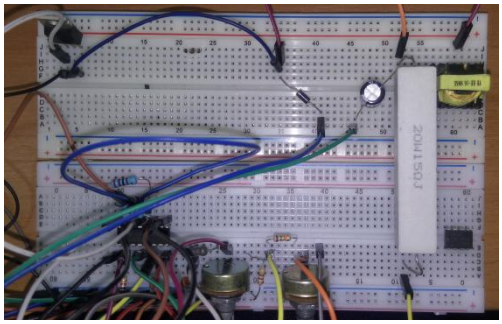

Figura 3. Implementação de um conversor Buck.

Entretanto, devido a pandemia da covid-19 as atividades presenciais no IFMS foram suspensas conforme memorando n. 5/2020/DIGEP/RT/IFM. Logo, os resultados finais, tais como, implementação do protótipo e análises dos resultados experimentais, bem como a finalização do protótipo não puderam ser realizadas. Assim, o projeto foi finalizado conforme orientação da reitoria/PROPI.

Considerações Finais

O projeto apresentado ilustra a formulação e proposta de um circuito controlador para uma fonte chaveada do tipo Buck. O projeto do controlador é baseado em uma função quadrática de Lyapunov e Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs). Foram, propostas condições suficientes, baseadas em LMIs que, quando factíveis, asseguram a estabilidade do sistema, visando assim uma melhor performance dos controladores de carga. Ademais, ressalta-se que o método de controle resultante é uma função de controle chaveado implementável em um micro-controlador do tipo arduino Mega. Baseados nos resultados apresentados, a continuidade do trabalho se propõe em considerar a implementação do protótipo e análises dos resultados experimentais, bem como a finalização do protótipo interrompidos devido a pandemia Covid-19.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Cnpq e ao IFMS pelo apoio e incentivo para realização do projeto.

Referências

DECARLO, R. A.; BRANICKY, M. S.; PETTERSSON, S.; LENNARTSON, B. Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems. Proceedings of IEEE, New York, v. 88, n.7, p. 1069–1082, july 2000.

SUN, Z.; GE, S. S. Analysis and synthesis of switched linear control systems. Automatica, Amsterdam, v. 41, n. 2, p. 181–195, february 2005.

LIBERZON, D.; MORSE, A. S. Basic problems in stability and design of switched systems. IEEE Control Systems, New York, v. 19, n. 5, p. 59–70, october 1999.

Mainardi Junior, E. I. Projeto de controladores para sistemas chaveados com aplicações em conversores cc-cc. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - UNESP, São Paulo, 2013.