

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	Hafez Bin Sarkawi
論文題目	Switching Control Strategies for the Robust Stabilization of a DC-DC Zeta Converter (DC-DCゼータコンバータのロバスト安定化のためのスイッチング制御方策)		
(論文内容の要旨)			
<p>直流電圧変換を行うパワーエレクトロニクス機器であるDC-DCコンバータは、動作状況によって入力電圧や負荷が大きく変動しても、出力電圧を目標値に保つ安定な動作が求められている。DC-DCコンバータは連続変数と離散モードをもつハイブリッドな動的振る舞いをするために、それに則した制御方策を考案することが必要である。本論文は、ハイブリッドな振る舞いを公称デューティ比で平均した平均化モデルと、ハイブリッドな振る舞いをそのまま記述したハイブリッドシステムモデルを用いて、ゼータコンバータに対する電圧調節のためのスイッチング制御方策を提案しており、全6章から構成されている。</p> <p>第1章では、まずDC-DCコンバータ回路について述べ、特に昇圧降圧双方の動作のできるゼータコンバータの特徴について説明している。さらにコンバータの電圧制御についての既存の研究結果について調べ、本研究で対象とするゼータコンバータでの電圧制御において解明すべき事項を整理している。</p> <p>第2章では、電圧制御のためのコンバータのモデリングを行い、ゼータコンバータの平均化モデルとハイブリッドモデルを導いている。またコンバータの二つの運転モードであるCCM (連続導通モード) とDCM (不連続導通モード) を説明している。</p> <p>第3章では、公称デューティ比における平均化モデルを用いてデューティ比制御による電圧制御を提案している。動作状況の変動に伴って平均化モデルには誤差が生じるが、その不確かさに対応するためにロバスト制御を適用し、モデル誤差のある状況でも制御性能がよいフィードバックゲインを適切な線形行列不等式を設定して求めている。その結果、単に最適レギュレータを用いたときよりも変動に強い制御を実現できたことをシミュレーションで示している。</p> <p>第4章では、CCMで動作するゼータコンバータに対して、ハイブリッドシステムモデルを用いて金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) のスイッチを制御して離散モードを切り替えるスイッチング制御則を提案している。エネルギーに基づいた制御リアプノフ関数の時間変化に基づいてスイッチングを行う。スイッチング制御の動作を微分包含で記述し、その平衡点となる動作点は局所漸近安定であることを証明している。またスイッチング周波数に制約を課すと解軌道は動作点の近傍に収束することを示している。さらに軌道を線形近似することにより、スイッチング周波数の見積もり方法を提案している。提案した制御則の有効性をシミュレーションにより確認している。</p> <p>第5章では、DCMで動作するゼータコンバータに対して、MOSFETのスイッチを制御して離散モードを切り替えるスイッチング制御則を提案している。CCMのときと同様にエネルギーに基づいた制御リアプノフ関数の時間変化に基づいてスイッチングを行う。スイッチング周波数に制約を課さないときには、十分時間がたてばCCMの動作しか現れなくなり、その結果、動作点は局所漸近安定であることを示している。提案した制御則の有効性をシミュレーションにより確認している。</p> <p>最後に第6章では、本論文の結論を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、動作状況によって入力電圧や負荷が変動しても、DC-DCゼータコンバータの出力電圧が目標値になるように制御するための方策を提案している。特にロバスト制御に基づいたフィードバックゲイン設計、ハイブリッド制御に基づいた切り替え制御方策について、以下の研究成果を得ている。

1. デューティ比制御による電圧のロバスト制御

コンバータ制御で広く用いられている平均化モデルは、公称デューティ比近傍でかつ十分大きな切り替え周波数であるときにコンバータの振る舞いを近似できる。平均化モデルに基づいて最適レギュレータを作ると、入力電圧の変動や目標値の変化に応じてデューティ比が大きく変動したときには、動作性能の劣化や不安定化など望ましくない振る舞いが生じることがある。本論文では、変動によって生じるシステムを包含する多面体を適切に構成する方法を提案し、その多面体から得られた線形行列不等式を解くことによってフィードバックゲインを設計している。このゲインを用いることによって、変動があっても制御性能を維持し、安定性も損なわれないことを示している。シミュレーションによって本手法の有効性を確認している。

2. 連続導通モード (CCM) における電圧の切り替え制御

ゼータコンバータの連続導通モードは、金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) とダイオードの開閉に応じて二つの離散モードをもつハイブリッドシステムとしてモデル化される。本論文では、エネルギーに基づいた制御リアプノフ関数を用いてMOSFETの開閉を制御するスイッチング制御を提案している。この制御の下での解軌道を含む微分包含を考察し、ラサールの不変原理を用いて平衡点である動作点が局所漸近安定となることを示している。前述の方法では、スイッチング周波数は際限なく大きくなるが、それに上限制約を設けたときには、解軌道は動作点近傍に収束することを示した。シミュレーションによって本手法の有効性を確認している。

3. 不連続導通モード (DCM) における電圧の切り替え制御

ゼータコンバータの連続導通モードは、MOSFETとダイオードの開閉に応じて三つの離散モードをもつハイブリッドシステムとしてモデル化される。CCMの二つの離散モードと、コンバータのもつ二つのインダクタ電流が等しく状態変数が縮退するモードを有する。本論文では、CCMのときと同様なスイッチング制御方策を提案している。そしてスイッチング周波数の上限に制約を設けないときは、時間が十分たてばCCMの二つの離散モードしか現れなくなることを示し、局所漸近安定性を示した。シミュレーションによって本手法の有効性を確認している。

以上、本研究はロバスト制御とハイブリッド制御を用いて、ゼータコンバータの電圧制御問題に対して、学術上意義の大きな結果を与えている。よって、本論文は博士 (情報学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年8月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。