

スイッチング方式電力変換回路のデジタル制御に基づく 故障予測に関する研究

長崎大学大学院工学研究科
中尾 宏

IoT (Internet of the Thing : 物のインターネット) 技術の拡大による通信データ量の増加は ICT (Information and Communication Technology : 情報通信技術) システムとそれを支える電源システムへの要求を厳しいものにしてきている。電源システムへの要求は、効率向上だけでなく、応答性、可用性、保守性を含め多岐にわたる。中でも設置数が多い大規模データセンターや、山中に点在する携帯基地局などでは、可用性、信頼性と保守コストのバランスが大きな問題となっている。現状、可用性は電源系多重化およびスポット保守によって担保されているが、動作中に負荷に影響を与えること無しに動作可能 (以下オンライン動作可能) な劣化検出、故障予知機能が低コストで実現できれば、効果的な予知保全が可能となり、信頼性向上、保守費用削減が期待できる。特に、動作条件の厳しい携帯基地局においては、多重化された電源系双方が同時に劣化、故障することも想定されるうえに故障発生箇所への保守要員の派遣そのものが容易でないことが多く、劣化検出、故障予知の効果は大きい。

スイッチング電源の構成部品のうち、故障の原因となる寿命部品としては、電解コンデンサ、パワー半導体、制御用半導体の順に高い故障率を持つことが知られており、そのそれぞれについて様々な劣化検出技術が検討されてきている。最も寿命の短い電解コンデンサに関しては、電源断後の放電時定数から容量変化を検出して交換指示のアラームをあげる手法、コンデンサの表面温度を監視し、経時的な温度履歴から寿命を推定する手法がすでに実用化、商品化されているが、前者は動作中の劣化検出ができず、後者はあくまで推定レベルであるうえ、いずれも追加回路、追加部品が必要でありコストアップにつながってしまう。パワー半導体、制御用半導体の劣化検出についてもオンライン動作可能、追加コスト無しという条件を満たすものは存在しない。

従来、スイッチング電源のデジタル制御化は、アナログ制御回路の単なる置き換えから、スイッチングタイミングの精密制御による電力変換効率向上、外部システムとの通信機能による状態監視、ロギング、さらには出力電圧を含む設定変更といった新機能を追加しながら進められてきた。

本論文ではデジタル制御電源ならではの新機能としてソフトウェア実装の故障予測機能を検討する。オンライン動作可能かつ追加コスト無しに実装可能な劣化検出、故障

予測技術の実現を目的として、制御用マイクロコンピュータが制御のために取得している入出力電流、電圧情報の時間依存性の傾向を元に故障予測を行うことを提案する。

具体的には、電解コンデンサの劣化およびパワー半導体、制御半導体の劣化は、それぞれ電源の過渡応答特性の劣化、静特性（効率低下、電圧ドリフト）の劣化として現れるため、これを制御における Duty 比のトレンド変化として検出する。SPICE および MATLAB/Simulink を用いた MILS (Model in the Loop Simulation: 動作シミュレーション) および RCP (Rapid Control Prototyping : 制御エミュレータによる実機評価)による実回路検証により、電解コンデンサの ESR (Equivalent Series Resistance: 等価直列抵抗) 劣化に関して初期値に対して 50%以上の分解能、効率低下、電圧ドリフトに関してそれぞれ 10%、1%の分解能で検出できることを示した。これは、電源構成部品の劣化検出には十分な感度であり、基本動作は検証できたことになる。今後は、製品化を目的として、故障予測対象部品拡大と製品レベルの電源に組み込んだのフィールド検証を進めていく。

最後に本論文の構成について紹介する。

第一章では、本研究の位置づけとして電源の故障予告技術の社会的意義と故障モードの分析および先行研究の紹介、加えて本論文で提案するデジタル制御電源の故障予測技術の概要について述べる。

第二章では、過渡応答特性の劣化検出による電解コンデンサの故障予測技術について述べる。

第三章では、静特性の劣化検出によるパワー半導体、制御用半導体の故障予測技術について述べる。

第四章では、ここまで述べてきた電源の故障予測技術と今後の展開についてまとめる。

以上述べてきたように本論文で提案する劣化検出、故障予測技術はいずれもオンライン動作可能で、デジタル制御電源のファームウェアとして追加回路、追加コスト無しに実装可能という特徴をもっており、ICT システムの信頼性向上、保守コスト低減に寄与すると信じる。

Study of Degradation Detection/Failure Prediction on Digitally Controlled Switching Mode Power Supply

Nagasaki University Graduate School of Engineering
Hiroshi Nakao

Recently, the rapid progress of IoT (Internet of the Thing) and the increase of data traffic make severe requests on ICT (Information and Communication Technology) and its power supply system. The demands on the power supply system are not only power saving with higher efficiency but rapid response, higher availability, higher maintainability and so on. The balance among cost, availability and reliability is a significant issue in a hyper scale datacenter with many power supplies or mobile base stations built in the deep mountains. The availability is supported by a multiplexing of power supply systems and an on-demand repairing. However, the low cost degradation detection/failure prediction enables the reliability improvement and the maintenance cost suppression supported by the effective predictive maintenance. The online degradation detection/failure prediction is more effective especially in the mobile base stations built in severe environments, because multiplexed power supply systems may be degraded simultaneously and immediate sending maintenance personnel to the failure site is not so easy.

The electrolytic capacitors, power semiconductors and control semiconductors are known as life limited parts in power supply systems, and there are many previous researches for failure prediction. In the case of the electrolytic capacitors, which have the highest failure rates, some techniques are made into products; evaluating thermal profile using temperature sensors installed with the electrolytic capacitors or evaluating voltage decay time constant after power off. However, the former is a statistical speculation and require over margin for underestimate, the latter is not used online. And the both require additional circuit and cost. There is not online failure prediction technique for power or control semiconductors, too.

Changing from analog to digitally control of power supply were progressed from simple replacement of analog controller to high-performance, efficiency improvement using precise control of switching timing, communication with higher level system, online parameter modification such as output voltage or so on. In this paper, the cost effective online degradation detection/failure prediction technique of digitally-controlled power supply implementable on a microcomputer for control is reported.

To predict failure online with no additional parts or circuit, failure prediction only using data

usually fetched to micro-computer or controller for power supply control.

The degradation of the electrolytic capacitors causes degradation of transient characteristics and the degradation of power or control semiconductors causes degradation of static characteristics such as efficiency degradation or drift of output voltage. So failure prediction is available with evaluating proportional and integral factor in feedback control. Over 50%, 10%, and 1% of resolution powers for initial values are confirmed using Model in the loop simulation with MATLAB/Simulink or SPICE and real circuit evaluation with Rapid Control Prototyping system. They are enough high resolution powers for online failure prediction. Implementing production level power supply and proof of concept in field are now planning.

This thesis is organized as following:

In chapter 1, to state the importance of this study, social meaning is reported. Then analyze of the failure modes of power supply and previous studies of failure prediction are reported. The digital control of power supply is also reported briefly.

In chapter 2, the failure prediction of the electrolytic capacitors using transient characteristics are reported.

In chapter 3, the failure prediction of the power or control semiconductors using static characteristics are reported.

In chapter 4, summary and future work for failure prediction is reported.

We believe this cost effective online degradation detection/failure prediction technique can contribute reliability improvement and maintenance cost suppression in ICT systems.