

電源システムの安定性解析について

安部 征哉

九州工業大学 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1

E-mail: abe@ele.kyutech.ac.jp

あらまし 情報通信装置内の電源構成は、分散給電システムが一般的に採用されている。分散給電システムはこれまでの多出力コンバータによる集中給電システムとは異なり、負荷直近に配置される Point of Load (POL) とバスコンバータで構成される。電源システムにとって重要な要素は高い安定性を維持することであるが、近年、分散給電システムにおける不安定現象の発生事例が数多く報告されている。POL の入力インピーダンスとバスコンバータの出力インピーダンスが周波数特性上で重なるとシステムに不安定現象が生じることがこれまでの研究で明らかになっている。分散給電システムの安定性解析のためにはシステムの安定限界および入出力インピーダンス特性に関する知見が必要である。本稿では、分散給電システムの安定性判別手法及び入出力インピーダンス特性について詳細に検討する。

キーワード 分散給電システム, 安定性, 入出力インピーダンス

Stability Analysis of Power Supply System

Seiya ABE

Kyushu Institute of Technology 1-1 Sensui-cho, Tabata-ku, Kitakyushu, 804-8550 Japan

E-mail: abe@ele.kyutech.ac.jp

Abstract The power supply architecture inside ICT equipment has been changing from conventional centralized power supply system which is using multi output converter to distributed power system with POL and Bus converter. The most important factor of power supply system is the higher system stability. However, many cases of the unstable phenomena on the distributed power supply system has been reported. It has been clarified that the overlap between the output impedance and input impedance causes system instability from recent research reports. The knowledge of the stability criterion and input - output impedance characteristics of the system is required for the analysis of the distributed power supply system. This paper presents the stability determination method and the input - output impedance characteristics in detail.

Keywords Distributed power supply system, System stability, Input and output impedance

1. はじめに

ICT 機器では様々な種類の LSI が使用されており、その駆動電圧も様々である。一方、LSI の多機能化により消費電流は増加の傾向にあり、加えて駆動電圧の低電圧化に伴いその許容誤差範囲は非常に狭くなっている。そのため、配線抵抗による僅かな電圧降下が LSI の誤動作の原因となり、この対策として Point of Load (POL) と呼ばれるコンバータを LSI の直近に配置する対策がとられている。このように、従来の 1 台の多出力コンバータで負荷に電力を供給する集中給電方式では、安定した電力供給が困難となってきたため、バスコンバータと POL で構成される分散給電システム

へと電源構成は移行してきた。

電源システムにおいて最も重要な事項は、システムの安定性であるが分散給電システムにおける不安定現象の発生事例が近年数多く報告されている。これは、POL の入力インピーダンスとバスコンバータの出力インピーダンスが周波数特性上で重なるために発生する不安定現象であることがこれまでの研究で明らかになっている [1-10]。

当初、この不安定現象は分散給電システムへ移行したことで発生した問題であると考えられていたが、分散給電システムを前段コンバータと後段コンバータの縦続接続系ととらえると、後段コンバータに入力フィ

ルタが接続された場合と等価であり、入力フィルタが接続されたコンバータの不安定現象については 1970 年代中盤にすでに議論されている [11]。

分散給電システムの安定性解析のためにはシステムの安定限界および入出力インピーダンス特性に関する知見が必要である。本稿では、分散給電システムの安定性判別手法及び入出力インピーダンス特性について詳細に検討する。

2. システム構成と伝達関数

図 1 にバスコンバータと POL で構成される分散給電システムを示す。簡単のため図 2 に示すようなバスコンバータに POL1 台が縦続接続された場合を考える。この場合、それぞれのコンバータが安定に動作していても、システムが不安定になる場合がある。図 3 に示すブロック図から分かるように入出力インピーダンスによりマナーループが形成されるためである。バスコンバータと POL の電圧伝達関数をそれぞれ $G_{vb}(s)$ 、 $G_{vp}(s)$ とすると、システム全体の電圧伝達関数 $G_{vv}(s)$ は次式で与えられる。

$$G_{vv}(s) = \frac{G_{vb}(s)G_{vp}(s)}{1 + Z_o(s)/Z_{in}(s)} \quad (1)$$

ただし、 $Z_o(s)$ はバスコンバータの出力インピーダンス、 $Z_{in}(s)$ は POL の入力インピーダンスを表す。

3. 安定判別

式(1) より、システムの安定性には、入出力インピーダンスが大きく関係している事がわかる。閉ループシステムの安定性は、特性方程式 $1 + Z_o(s)/Z_{in}(s)$ によって決まる。これは、 $Z_o(s)$ と $Z_{in}(s)$ の関係がシステムの安定性を決める事を意味している。図 4 に示すように、入出力インピーダンスが周波数特性上で重なるとシステムは不安定となり低周波の振動が中間バス電圧に発生する。システムの安定性のためにはインピーダンスが重ならないよう設計する必要があるが、すべての周波数領域で入出力インピーダンスが重ならないよう設計する事は非常に困難である。

一方、図 5 に示すように入出力インピーダンスが重なった場合でもシステムは安定に動作する場合がある。これは、入力インピーダンスの影響により位相余裕が大きくなったためである。POL の帯域がバスコンバータの帯域より十分に広い場合、図 6 に示すように $|Z_o(s)|$ のピーク値が $|Z_{in}(s)|$ の低周波成分 $|Z_{in}(0)|$ とほぼ等しくなるところで安定限界を迎え、 $|Z_{in}(0)|$ を超えるとシステムは不安定となる。このことから、新しい安定判別を図 7 の様に定義する事ができる。提案する安定判別手法ではバスコンバータの入力インピーダンスの低周波成分の大きさと POL の出力インピーダンスのピーク値が分かれば安定判別が可能となる。

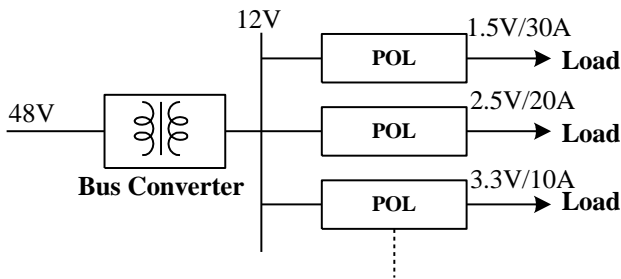


図 1. 分散給電システム

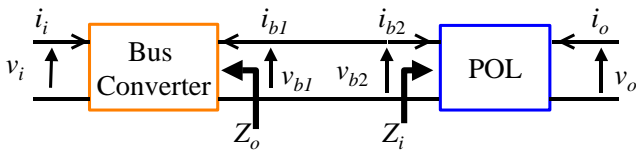


図 2. 簡略化した分散給電システム

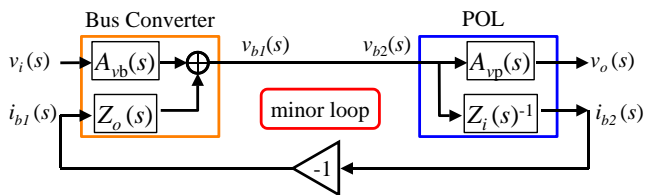


図 3. 分散給電システムのブロック図

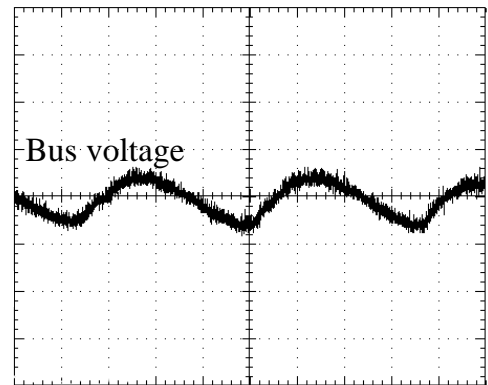


図 4. 中間バス電圧波形 (不安定な場合)

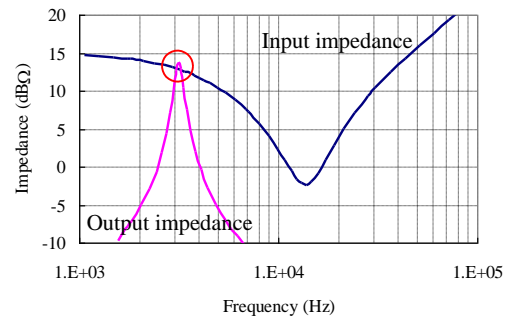


図 5. インピーダンス特性(不安定にならない場合)

4. 入出力インピーダンス解析

バスコンバータの出力インピーダンスと POL の入力インピーダンスは状態平均化法[12-13]より導出することができる。

4.1. 入力インピーダンス

開ループの入力インピーダンスは状態平均化法により簡単に導出できるが閉ループの入力インピーダンスの導出はかなり難解なためここでは説明を割愛する。閉ループの入力インピーダンス $Z_{in}(s)$ は次式で与えられる。

$$\frac{1}{Z_{in}(s)} = \frac{1}{Z_N(s)} \cdot \frac{T_p(s)}{1+T_p(s)} + \frac{1}{Z_D(s)} \cdot \frac{1}{1+T_p(s)} \quad (2)$$

ただし、

$Z_D(s)$: 無制御時の入力インピーダンス

$Z_N(s)$: 理想フィードバック時の入力インピーダンス

$T_p(s)$: POL の一巡伝達関数

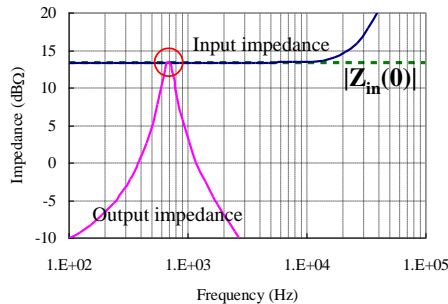
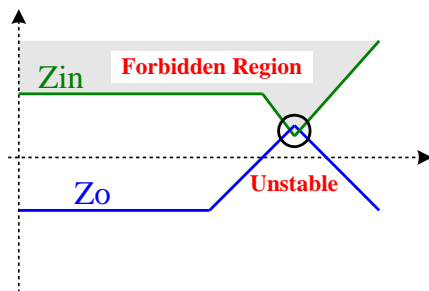
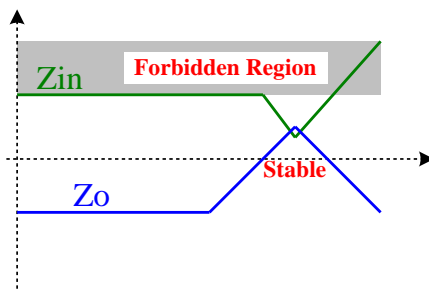


図 6. インピーダンス特性(安定限界)



(a) 従来の安定判別



(b) 提案する安定判別

図 7. 安定判別手法

複数の POL が接続された場合は、各 POL の出力インピーダンスを導出し、並列合成すれば全体の入力インピーダンスが得られる。

入力インピーダンスの低周波成分 $|Z_{in}(0)|$ は $s = 0$ として式(2) から得られる。POL として一般的に用いられる降圧型コンバータの場合、次式となる。

$$|Z_{in}(0)|_{(dB\Omega)} \approx 20 \log \left(\frac{1}{D^2} \frac{V_o}{I_o} \right) \quad (dB\Omega) \quad (3)$$

ここで、 $|Z_{in}(0)|$ は定格負荷時に最小となるため、 $|Z_{in}(0)|$ の概算は定格負荷で行う必要がある。

4.2. 出力インピーダンス

バスコンバータの閉ループ出力インピーダンス $Z_{oc}(s)$ は開ループの出力インピーダンスを $Z_o(s)$ とすると次式で与えられる。

$$Z_{oc}(s) = \frac{Z_o(s)}{1+T_b(s)} \quad (4)$$

ただし、 $T_b(s)$: POL の一巡伝達関数

開ループの場合、図 8 に示すように、出力インピーダンスのピーク周波数は、一巡伝達関数の共振周波数 f_p と一致する。従って、出力インピーダンスのピーク値は式(5)において、 $s = j\omega_b$ として近似すると次式で与えられる。ただし、バスコンバータにはハーフブリッジコンバータを用いることとする。

$$Z_{o_peak} = \frac{L_b}{C_b (r_{L_b} + r_{C_b})} \quad (\Omega) \quad (5)$$

閉ループの場合、出力インピーダンスのピーク周波数は、一巡伝達関数におけるクロスオーバー周波数 f_c に移動する。 $s = j\omega_c$ として式(4)に代入し近似すると、閉ループ時の出力インピーダンスのピーク値は次式で与えられる。

$$Z_{oc_peak} = \frac{L_b}{C_b \left\{ \left(\frac{f_c}{f_p} \right)^2 r_{C_b} + r_{L_b} \right\}} \quad (\Omega) \quad (6)$$

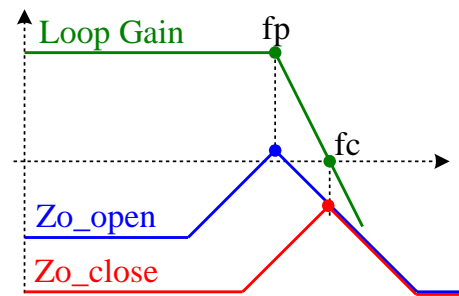
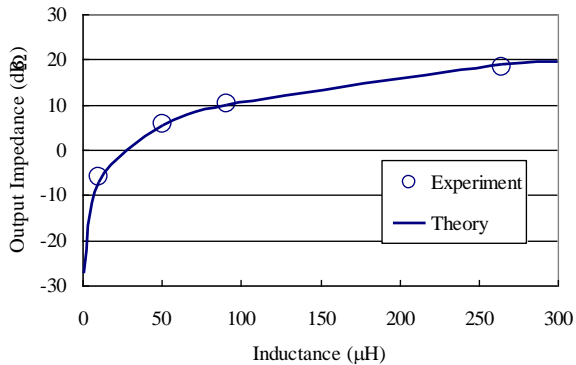
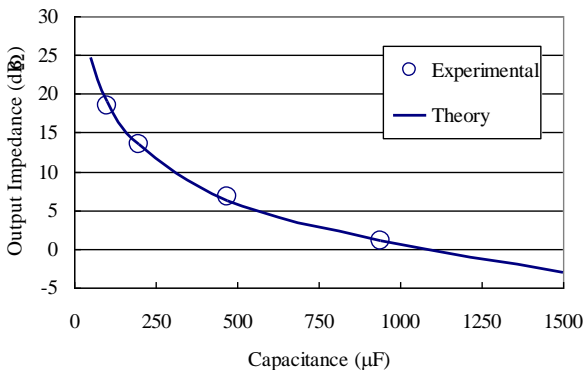


図 8. 出力インピーダンスピーク

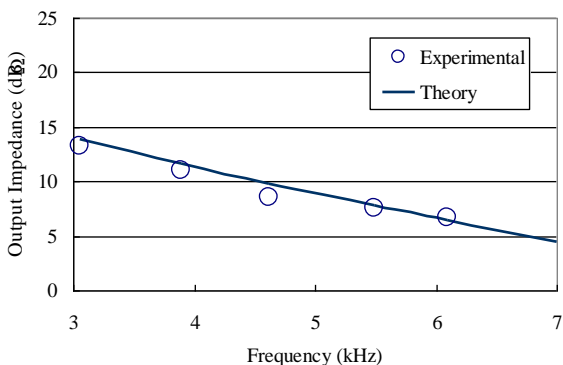
上式において、 $f_c = f_p$ とすると式(5) は式(6)と同じになる。このことから、開ループ・閉ループを問わず出力インピーダンスのピーク値は式(6) から求める事ができる。出力インピーダンスのピーク値と各パラメータの関係を図9に示す。インダクタンスを小さくする、コンデンサを大きくする、制御帯域を広くすることで出力インピーダンスのピーク値は小さくなる事が分かる。



(a) インダクタンスとの関係



(b) キャパシタンスとの関係



(c) 制御帯域との関係

図9. 出力インピーダンスと各パラメータの関係

5. まとめ

本稿では、分散給電システムにおける不安定現象の発生メカニズム、安定判別手法及び入出力インピーダンス特性について詳細に検討した。

文 献

- [1] C. M. Wildrick, F. C. Lee, B. H. Cho, B. Choi, "A Method of Defining the Load Impedance Specification for A Stable Distributed Power System", IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 10. No. 3. May 1995, pp. 280-284.
- [2] X. Feng, Z. Ye, K. Xing, F. C. Lee, D. Borojevic, "Individual Load Impedance Specification for a Stable DC Distributed Power System", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC) 1999, pp. 923-929.
- [3] X. Feng, F. C. Lee, "On-line Measurement on Stability Margin of DC Distributed Power System", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC) 2000, pp. 1190-1196.
- [4] M. P. Sayani, J. Wanes, "Analyzing and Determining Optimum On-Board Power Architectures for 48V-input Systems", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC) 2003.
- [5] 久永光司, 原田耕介「中間バスコンバータを用いた分散電源方式における系の安定性について」, 電子情報通信学会信学技報, Vol.103, No.199, pp.19-24, 2003年7月.
- [6] 久永光司, 原田耕介「中間バスコンバータを用いた分散電源方式における系の安定性について(第2報)」, 電子情報通信学会信学技報, 電子情報通信学会信学技報 Vol.103, No.652, pp.7-12, 2004年2月.
- [7] Y. Ren, M. Xu, K. Yao, Y. Meng, F. C. Lee, J. Guo, "Two-Stage Approach for 12V VR", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC) 2004.
- [8] J. Wei, F. C. Lee, "An Output Impedance-Based Design of Voltage Regulator Output Capacitors for High Slew-Rate Load Current Transients", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC) 2004.
- [9] 安部征哉, 広川正彦, 財津俊行, 二宮保「オンボード分散給電システムにおける安定化設計」, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B, No.5, pp.638-645, 2006年5月.
- [10] S. Abe, M. Hirokawa, T. Zaitso, T. Ninomiya, "Stability Design Consideration for On-Board Distributed Power System Consisting of Full-Regulated Bus Converter and POLs", IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC) 2006, pp.2669-2673.
- [11] R. D. Middlebrook, "Input Filter Considerations in Design and Application of Switching Regulators", IAS'76, 1976, pp. 91-107.
- [12] R.D. Middlebrook, S. Cuk, "A General Unified Approach to Modeling Switching-Converter Power Stages," IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC) 1976, pp. 18-34.
- [13] T. Ninomiya, M. Nakahara, T. Higashi, K. Harada, "A Unified Analysis of Resonant Converters," IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 6. No. 2. April 1991, pp. 260-270.