

学 位 論 文 の 要 旨

論文題目: Study of Multiphase Networks, Noise Reduction for DC-DC Converters,
and Stability Test for Electronic Systems

(和訳) 多相ネットワーク、DC-DC コンバーターのノイズ低減化、
電子システムの安定性試験の研究

氏 名 Tran Minh Tri 印

この論文では、電子システムにおけるいくつかのノイズの問題と、多相ネットワーク、DC-DC コンバーター、負帰還構成のアナログ回路の3種類のアナログ回路の試験の側面を扱った。低IF受信回路のイメージノイズ、DC-DC コンバーターのリップルノイズ、および負帰還構成のアナログ回路の減衰振動ノイズの研究を行った。この研究の焦点は、大量生産試験段階で高パフォーマンス、低ノイズ、および高安定性の優れた歩留まりを獲得するための回路網解析理論の基本的な概念である。この研究では、低IF受信回路、スイッチング変換器、および高次帰還システムのノイズの問題について実際の深い内容を解明した。この論文の主な貢献は、マルチソース回路網解析の重ね合わせ式、DC-DC 降圧変換器のリップル低減技術、および高次線形電子システムのリングング試験である。拡張した重ね合わせ式、比較測定、および交流電流保存を、それらの動作を解析、シミュレーション、および予測するために導入した。

多相ネットワークは、多相フィルタ、複素フィルタ、直交信号生成回路などの無線通信システムで広く使用されている。拡大された重ね合わせの原理を適用することにより、多相ネットワークの伝達関数が容易に導き出されることが示されている。受動RC多相フィルタの正の周波数領域では、パスバンドゲインリップルは、コーシーの不等式定理に基づいてカットオフ周波数が定義される2つのRCバンドストップフィルタによって低減することを提案した。4次Rauch、Tow-Thomas、およびAkerberg-Mossberg複素フィルタの伝達関数を調べた。シミュレーション結果を数学的解析と比較し、伝達関数の特性は同等であることを確認した。これらの概念をマルチソース回路網解析理論へ組み込んだのは新規であり、回路理論、解析、および実装で新しい知見を得た。さらに、直交信号発生回路の実用設計も行った。寄生要素とR、Cコンポーネントの値の変動により、実装回路でIQ回路の不一致が発生する問題も見出した。

一部のアプリケーションでは、DC-DC コンバーターの時間応答、オーバーシュート現象、および出力電圧リップルに対する性能要求が非常に厳しい。電力変換器の電力段の簡略化されたモデルは、2次の複雑な関数になる。拡散スペクトル技術とLCハーモニッ

クノッチフィルタを用いることを考案し、DC-DC コンバーターの出力リップルが小さく保たれてることを確認した。このノッチフィルタの受動インダクタを、設計したインピーダンス変換器に置き換えた。これらの手法により、大量生産試験段階で DC-DC コンバーターの歩留まりを大幅に向上させることができる。これらは、適応帰還回路網として、DC-DC コンバーターの目的の出力電圧のサンプリングレベルを使用して、参照電圧と比較することに基づいている。したがって、変換器の電力段は、システム全体の動作を定義する。DC-DC コンバーターのエネルギーは、電力段での負荷コンデンサのバランス充放電時間に基づいて最大に伝播される。出力ポートに受動ハーモニックノッチフィルタを追加すると、電力段は 4 次の複素関数になり、位相余裕が 46 度から 49 度に改善される。リップルも 11mVpp から 5mVpp に低減でき、これは 5 V の目的の出力電圧と比較される。その結果、電圧リップルのスペクトルも -35dBV から -38dBV に最小化される。従来のナイキスト安定性基準の限界を克服するために、DC-DC 降圧変換器の電力段の新しい位相余裕試験を提案した。数学的解析と測定結果とを比較すると、自己ループ関数の特性は同じであることが確認できた。

高次システムの自己ループ関数のニコルズ線図は、相対的な安定性に関する有用な情報を提供することを示した。このチャートは、内部の設計を提供し、安定性が達成された位相余裕を明示する。アナログフィルタ、アンプ、または負帰還構成のオペレーショナルアンプ回路網の伝達関数で自己ループ関数を導出するために、比較測定と交流電流保存方法を導入した。安定性試験は、自己ループ関数のユニティゲインでの位相余裕の調査によって実行される。位相余裕の理論的解析は、MATLAB 計算、SPICE シミュレーション、および実際の測定によって検証される。これらのシステムの動作領域は、過減衰、臨界減衰、および過小減衰に場合分けできる。アンダーダンピングの場合、リングングはダンピングされた発振ノイズを引き起こし、システムを不安定にする。動作領域は、パスカルの三角形に基づいて理論的に定義できることを示した。自己ループ関数のニコルズ線図は、電子システムの安定性試験に役立つツールになることを示した。

学 位 論 文 の 要 旨

論文題目: Study of Multiphase Networks, Noise Reduction for DC-DC Converters,
and Stability Test for Electronic Systems

(和訳) 多相ネットワーク、DC-DC コンバーターのノイズ低減化、
電子システムの安定性試験の研究

氏 名 Tran Minh Tri 印

This dissertation deals with some noise issues in electronic systems and testing aspects of three types of analog circuits: multiphase network, DC-DC converter, analog circuit with negative feedback configuration. Image noise in low-IF receivers, ripple noise in DC-DC converters, and damped oscillation noise in analog circuits with negative feedback configurations are studied. The focus of this work is the fundamental concepts for network analysis theory to acquire good yield of their performance, low noise, and high stability at the mass production testing stage. This work will be to provide a real and deep understanding of noise issues in low-IF receivers, switching converters, and high-order feedback systems. The main contributions of this dissertation are the superposition formula for multi-source network analysis, the ripple reduction techniques for DC-DC buck converters, and the ringing test for high-order linear electronic systems. The widened superposition formula, the comparison measurement, and the alternating current conservation are introduced for analyzing, simulating and predicting their behaviors.

Multiphase networks are widely used in wireless communication systems such as polyphase filters, complex filters, and quadrature signal generation circuits. It is shown that by applying the widened superposition principle, the transfer functions of multiphase networks are easily derived. In the positive frequency domain of a passive RC polyphase filter, the pass-band gain ripple is reduced by two RC band-stop filters where the cut-off frequencies are defined based on the Cauchy's inequality theorem. The transfer functions of fourth-order Rauch, Tow-Thomas, and Akerberg-Mossberg complex filters are introduced and investigated. Compare the simulation results with mathematical analysis, the properties of transfer functions are the same. The import of these concepts into multi-source circuit analysis theory is relatively new with much recent progress regarding circuit theory, analysis and implementation. Furthermore, a practical design for quadrature signal generation circuit was also performed. It is found

that the parasitic elements and the value variation of the R, C components caused the IQ mismatches in the implemented circuit.

The requirements for the time response, the overshoot phenomena and the output voltage ripple of DC-DC converters are extremely strict in some applications. The simplified model of the power-stage is a 2nd-order complex function. It is shown that the output ripple of a DC-DC converter is kept very small by a spread spectrum technique and an LC harmonic notch filter. The passive inductor in this notch filter is replaced by a designed impedance converter. These techniques can improve the DC-DC converter yield significantly at the mass production testing stage. They are based on the fact that as an adaptive feedback network, the sampling level of the desired output voltage of the DC-DC converter is used to compare with a referent voltage. Therefore, the power stage of the converter defines the behavior of the total systems. Energy of the DC-DC converter is maximally propagated based on the balance charge-discharge time of the load capacitor at the power stage. After adding a passive harmonic notch filter at the output port, the power-stage is a 4th-order complex function and the phase margin is improved from 46 degrees to 49 degrees. The ripple is also reduced from 11 mVpp to 5 mVpp which is compared to the desired output voltage of 5 V. As a result, the spectrum of the voltage ripple is also minimized from -35 dBV to -38 dBV. A new phase margin test for the power-stage of a DC-DC buck converter is proposed to overcome the limitation of the conventional Nyquist stability criterion method. Compared to the measurement results with mathematical analysis, the properties of self-loop functions are the same.

The Nichols chart of the self-loop function of a high-order system gives useful information about the relative stability. This chart provided design insides and specifies of the phase margins by which stability was achieved. To derive the self-loop function in a transfer function of analog filter, amplifier, or operational amplifier network with negative feedback configuration, the comparison measurement and the alternating current conservation methods are introduced. The stability test is performed by the investigation of the phase margin at unity gain of a self-loop function. The theoretical analysis of the phase margin is verified by MATLAB calculation, SPICE simulation, and the practical measurements. The operating regions of these systems can be classified into over-damping, critical damping, and under-damping. In case of under-damping, ringing causes the damped oscillation noise and makes the system unstable. The operating region can be theoretically defined based on the Pascal's triangle. Nichols chart of the self-loop function is considered as a useful tool for stability test of electronic systems because it can be easily integrated in network analyzers.