

プッシュプルパラメトリック変圧器の過渡現象解析

Transient Analysis of a Push-Pull Parametric Transformer

田島克文・齋藤宗則・加賀昭夫・一ノ倉 理*

秋田大学鉱山学部電気電子工学科, 秋田市手形学園町 1-1 (〒010)

*東北大学工学部, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980)

K. Tajima, M. Saitoh, A. Kaga, and O. Ichinokura*

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Akita Univ., 1-1 Tegata-Gakuencho, Akita 010

*Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Aramaki, Aoba, Aoba-ku, Sendai 980

This paper describes the transient characteristics of an orthogonal-core type push-pull parametric transformer. We analyzed the characteristics by means of a circuit network, in which the reluctance network of an orthogonal-core and the outer electric circuits are coupled with each other. As one example of the transient analysis, we calculated the voltages and currents of the transformer when a short-circuit fault or an open circuit occurred in the load circuit. Some useful information for the design of the transformer was obtained.

Key words: transient analysis, orthogonal-core, SPICE, push-pull parametric transformer, reluctance network

1. ま え が き

近年, 配電系統において, 半導体機器より生じる高調波電流を原因とする各種の高調波障害が問題となっており, その対策が必要となってきた¹⁾.

先に筆者らが提案したプッシュプルパラメトリック変圧器は, 電源装置として有用な種々の機能を具備するほか, 整流回路などの半導体機器を負荷とした場合にも入力電流波形は大略正弦波となり, 負荷高調波電流に対する一種のフィルタ機能を有することが知られている^{2), 3)}. このため本変圧器を半導体機器に対する高調波障害対策用電源装置とする応用が検討されている.

本変圧器は電源装置として使用されるため, その実用化には定常運転時の特性はもちろん, 始動・停止時ならびに負荷短絡時などの過渡現象についても明らかにしておかねばならない.

筆者らはすでに定常運転時に関しては定量的な動作解析により詳細な検討を行っている²⁾. しかし, 過渡特性に関しては, 本変圧器の回路動作が複雑になるなどの理由から従来は定量的な動作解析が困難とされ, 十分な検討は行われていなかった.

これに対し, 筆者らは最近, 複雑な回路動作を考慮可能な動作解析法を開発した^{4), 5)}.

本論文は, この動作解析法を用いてプッシュプルパラメトリック変圧器の負荷短絡・開放時の過渡現象解析を行った成果について報告するものである.

2. プッシュプルパラメトリック変圧器について

Fig. 1 にプッシュプルパラメトリック変圧器²⁾の基本回路構成を示す. 図中の×印は直交磁心と呼ばれる非線形磁気素子で

ある. 本変圧器は, 同一構成の直交磁心 2 台をダイオードを介して並列接続した回路に対し, 1 次側には入力正弦波交番電圧 e_p を印加し, 2 次側には同調用コンデンサ C と負荷を接続したものである. 本装置の 2 次側回路においてパラメトリック発振が生じれば, 確立した出力電圧 e_o により負荷に電力を供給できる. i_p は入力電流, i_L は負荷電流である.

Fig. 2 に抵抗負荷時における各部の電圧電流波形の一例を示す. 図中の R は負荷抵抗値, E_p , f は入力電圧の実効値, 周波数である. 同図より, 本変圧器では出力として入力電圧と周波数の等しい交番電圧が確立しており, 入力電流波形は大略正弦波状となっていることがわかる. この低歪の入力電流波形は抵抗負荷時だけでなく, 半導体機器を負荷とする場合も同様であることが報告されている³⁾.

本変圧器は直交磁心とダイオードが直列に接続された回路構成をとるため, 入力電源の投入・遮断あるいは負荷短絡・開放

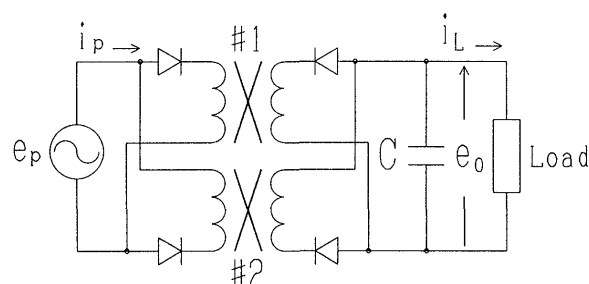
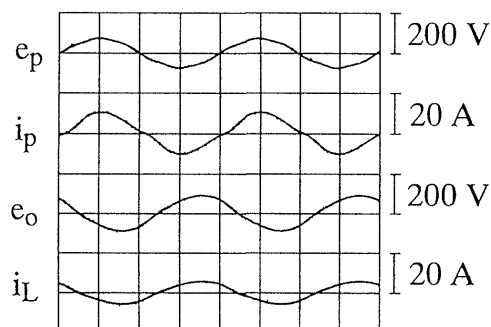


Fig. 1 Circuit configuration of a push-pull parametric transformer.



($C = 350 \mu\text{F}$, $E_p = 50 \text{ V}$, $R = 16 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$)

Fig. 2 Voltage and current waveforms.

などに伴い複雑な過渡現象を生じ、過大電圧・電流が発生する場合には設計上その値を定量的に把握しておく必要がある。

このような過渡現象の解析には非線形磁気素子である直交磁心の磁心動作をも考慮した詳細な解析法が必要である。

直交磁心は、Fig. 3 に示すように同一形状のカットコア 2 個を空間的に 90° 転移接続して構成される。 N_1, N_2 は 1 次および 2 次巻線であり、 i_1, i_2 は 1 および 2 次巻線電流を示す。本論文では磁心材質には 0.35 mm 厚の方向性けい素鋼を用い、巻線数は 1 次、2 次とも 200 ターンとした。 R_1, R_2 は 1 次および 2 次巻線抵抗である。このときの 1 次および 2 次磁心磁束 ϕ_1, ϕ_2 の流れを破線により概略的に示す。直交磁心は、1 次巻線と 2 次巻線の磁氣的結合は小さく通常の変圧器としては動作しない。しかしながら、1 次と 2 次の磁路が磁心接合部で一部共有されているため、この部分で磁気飽和を生じた場合、1 次と 2 次との間で相互作用を生じるようになる⁶⁾。Fig. 4 にヒステリシスを無視した場合の直交磁心の 2 次側磁化特性の測定例を示す。図をみると、1 次側からの励磁により 2 次側からみた実効的なインダクタンスが低下し、直交磁心が一種の変可変インダクタンスとして動作していることが了解される。

この直交磁心の複雑な磁心動作を考慮したブッシュプルパラメトリック変圧器の動作解析法として、真交磁心の磁界解析と本変圧器の回路解析を連成解析する手法が考えられる。

ただし、直交磁心の磁界解析には、1 次と 2 次の共通磁路である磁心接合部分の磁気飽和、およびそれに伴う漏れ磁束の発生・磁心磁束分布の粗密を考慮する必要があり、いわゆる三次元非線形問題を解析可能な手法が必要となる⁷⁾。この場合、通常の磁界解析で広く用いられている有限要素法の適用は使用メモリ量、計算時間の点から実用的ではないものと考えられる。

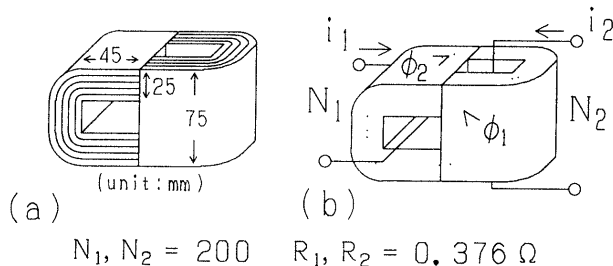


Fig. 3 Core structure and winding arrangement of an orthogonal-core.

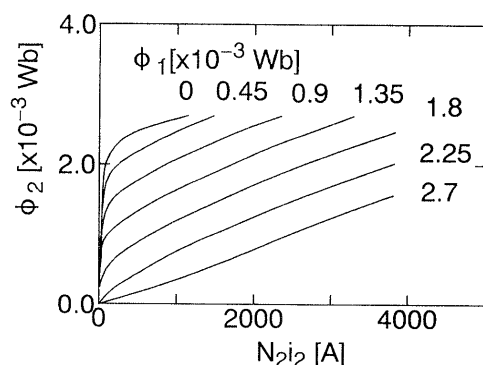


Fig. 4 Flux-MMF relationships of an orthogonal-core.

3. 磁心動作を考慮した直交磁心形電力変換器の解析手法

筆者らは前章で述べた理由から、直交磁心の三次元非線形磁気回路モデル⁷⁾を用いた動作解析法を提案した^{4), 5)}。

本磁気回路モデルは直交磁心の三次元的な磁束分布を考慮するために直交磁心を三次元磁気回路でモデリングし、回路素子の特性には磁心材質の非線形特性（飽和特性、ヒステリシス）と磁心寸法を考慮して決定した。本論文では磁心材質に方向性けい素鋼を使用しているが、本モデルには積層方向の特性も含めた磁気特性の異方性が考慮されている⁷⁾。

また、本モデルの解析には SPICE などの市販の回路シミュレータを使用できるため、外部回路と組み合わせることにより、直交磁心の磁心動作を考慮したブッシュプルパラメトリック変圧器の動作解析を簡単かつ比較的高速に行うことができる。本手法の詳細は文献 4, 5 を参照されたい。

4. 解析結果

本変圧器の過渡解析に使用した回路を Fig. 5 に示す。抵抗負荷 R を接続した定常運転状態から、スイッチ S_{w1} を閉じれば負荷短絡を、 S_{w2} を開けば負荷開放をシミュレートできる。図中の $i_{11} \sim i_{22}$ は直交磁心 #1, #2 の各々の 1 次および 2 次巻線電流を示す。回路の対称性より、考察は直交磁心 #1 の巻線電流 i_{11}, i_{21} についてのみ行えば十分である。

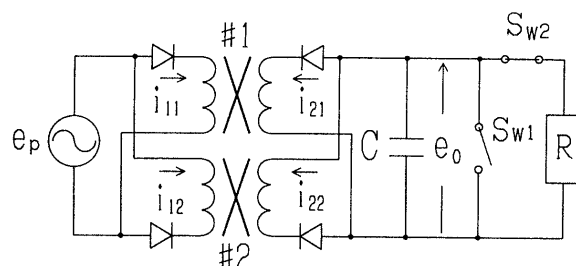
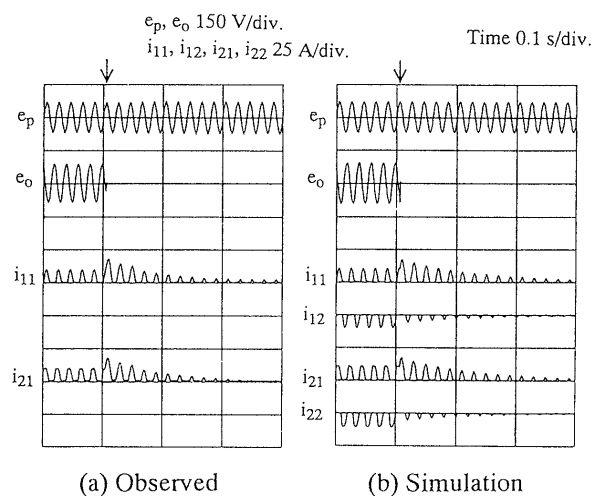


Fig. 5 Circuit configuration for the simulation and the measurement.



($C = 350 \mu\text{F}$, $E_p = 50 \text{ V}$, $R = 16 \Omega$, $f = 50\text{Hz}$, $\omega t_s = 104^\circ$)

Fig. 6 Waveforms when S_{w1} closes.

4.1 負荷短絡時の過渡解析

まず、本論文で使用する動作解析法の妥当性を検証するため、出力および巻線電流値が比較的小さくなる回路条件において実験を行い、実験値と解析結果を比較する。

Fig. 6 に負荷短絡時の各部の電圧電流波形例を示す。図中の矢印は負荷短絡・開放の生じた時刻を示し、Fig. 7 に示すように入力電圧 e_p を基準とした位相 ωt_s により表される。

負荷短絡の場合、出力電圧は短絡とほぼ同時に零となり、各巻線電流は一時的に電流値が定常状態の振幅よりも大となるものの短時間で減衰することがわかる。ただし、この電流値が極めて大きい場合、本変圧器の故障につながる可能性がある。Fig. 8 に種々の位相 ωt_s における負荷短絡後の各巻線電流の最大値を示した。同図より、過渡電流の最大値は短絡時刻により変化していることがわかる。シミュレーション結果は実験値と良好な対応を示しており、本動作解析法の妥当性が了解される。

以下、シミュレーションにより、回路条件による過渡電流最

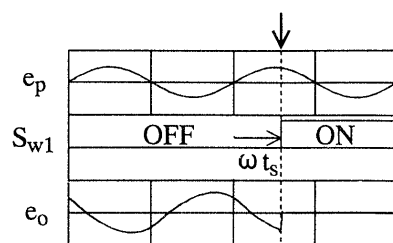
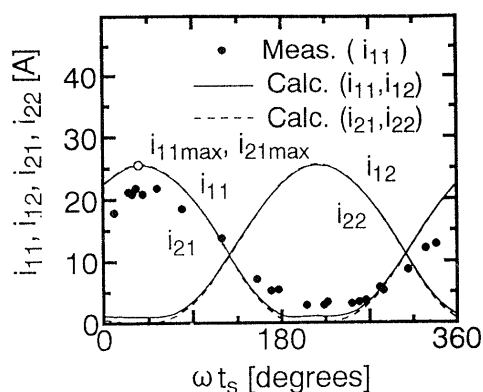


Fig. 7 Schematic of ωt_s .



($C = 350 \mu\text{F}$, $E_p = 50 \text{ V}$, $R = 16 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$)

Fig. 8 Winding currents after S_{w1} closes.

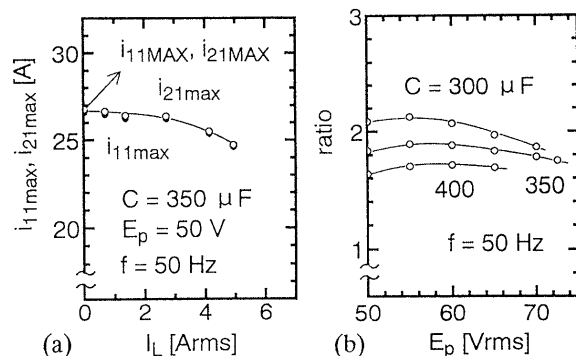


Fig. 9 $i_{11\text{max}}$, $i_{21\text{max}}$, and $i_{21\text{MAX}}$ for various circuit condition after S_{w1} closes.

大値の変化について考察する。

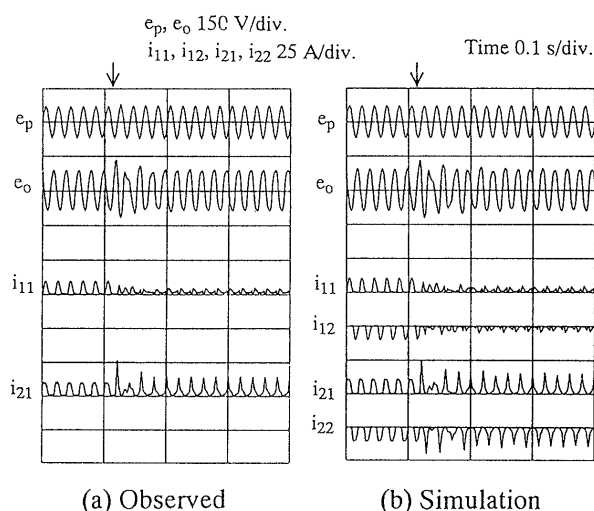
Fig. 8 における電流 i_{11} , i_{21} の最大値を $i_{11\text{max}}$, $i_{21\text{max}}$ と定義した場合、負荷抵抗値による $i_{11\text{max}}$, $i_{21\text{max}}$ の変化は Fig. 9(a) に示すようになる。図中の I_L は短絡前の負荷電流実効値である。

$i_{11\text{max}}$, $i_{21\text{max}}$ は無負荷時に最大となり、負荷をとるにつれて減少する傾向を示すことがわかる。

次に、この無負荷時における $i_{21\text{max}}$ の最大値を $i_{21\text{MAX}}$ と定義して、同調用コンデンサ容量 C 、入力電圧実効値 E_p による変化を検討する。ただし、 $i_{21\text{MAX}}$ は定常運転時における i_{21} の振幅に対する割合 ratio で示すものとした。Fig. 9(b) より $i_{21\text{MAX}}$ は C の増加に対し減少し、 E_p による変化は比較的小さいことがわかる。その最大値は 2.1 倍程度であった。

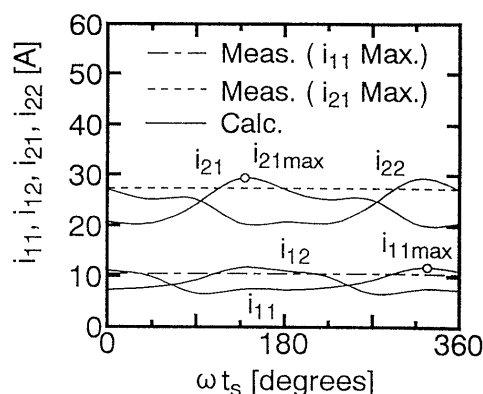
4.2 負荷開放時の過渡解析

同様に負荷開放時に対しても検討を行う。Fig. 10 に各部の電圧電流波形例を示す。ただし、負荷開放時の実験において位相 ωt_s は観測結果より推定することは困難であるため、観測波形にはシミュレーション波形に近いものを参考として示している。この場合、出力電圧は変動するもののその変動量は小さく 5~10 周期程度で定常状態となること、2 次巻線電流に急峻な



($C = 350 \mu\text{F}$, $E_p = 50 \text{ V}$, $R = 16 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$, $\omega t_s = 225^\circ$)

Fig. 10 Waveforms when S_{w2} opens.



($C = 350 \mu\text{F}$, $E_p = 50 \text{ V}$, $R = 16 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$)

Fig. 11 Winding currents after S_{w2} opens.

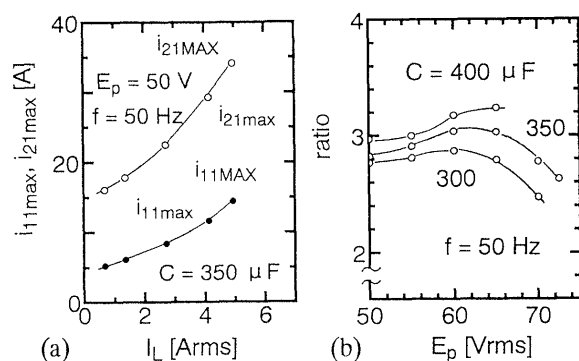


Fig. 12 $i_{11\max}$, $i_{21\max}$, and $i_{21\max}$ for various circuit condition after S_{w2} opens.

過大電流が発生していることがわかる。この電流最大値の位相 ωt_s に対する変化を Fig. 11 に示した。前述したように実験時には位相の推測が困難であるため種々測定した中での最大値のみを示している。計算値の最大値 $i_{11\max}$, $i_{21\max}$ と実験値は良好な対応を示しており、本動作解析法により負荷開放時のシミュレーションも可能であることが了解される。

Fig. 12(a) に負荷抵抗値による $i_{11\max}$, $i_{21\max}$ の変化を示す。これらの電流値は負荷をとるにつれて増大する傾向を示す。また、 $i_{11\max}$ は $i_{21\max}$ と比較して半分以下の値となり負荷開放時の影響は入力電源側では小さいことがわかる。

次にこのときの $i_{21\max}$ の最大値 $i_{21\max}$ に着目し、 C , E_p による変化を検討した。Fig. 12(b) より ratio は負荷短絡時とは異なり、 C の増加に対し増大し、 E_p の増加に対しては凸に変化することがわかる。その値は開放時の 3.2 倍程度であった。

5. あとがき

以上、直交磁心形プッシュプルパラメトリック変圧器において負荷短絡・開放時の過渡解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

1. 本論文で用いた動作解析法は本変圧器の負荷短絡・開放時の過渡解析に適用可能である。
2. 過渡電流最大値の短絡時刻 ωt_s に対する依存性は、負荷短絡時は大きく、負荷開放時には小さい。
3. 負荷開放時の影響は入力電源側では比較的小さい。
4. 負荷抵抗値による $i_{11\max}$, $i_{21\max}$ の変化をみた場合、負荷短絡時は無負荷時において、負荷開放時は負荷時に大となり、負荷の変化の度合いが大きいほど $i_{11\max}$, $i_{21\max}$ は大きくなる。
5. 同調用コンデンサ容量 C , 入力電圧実効値 E_p による $i_{21\max}$ の変化は、負荷短絡時は E_p による変化は小さいものの、 C の増加に対しては減少し、その値は最大でも短絡前の 2 倍程度であった。負荷開放時は C の増加に対しては増大し、 E_p の増加に対しては凸に変化する。その値は開放前の 3.2 倍程度となった。

本論文より得られた成果はプッシュプルパラメトリック変圧器の設計を行う上で有用な知見と考えられる。

謝 辞 御指導を頂いている東北大学名誉教授（現八戸工業大学学長）村上孝一先生に謝意を表する。

文 献

- 1) 例えば、井上昌彦：電気学会論文誌 (D), **108**, 1074 (1988).
- 2) 田島克文, 一ノ倉 理, 穴澤義久, 加賀昭夫：日本応用磁気学会誌, **15**, 507 (1991).
- 3) 一ノ倉 理, 田島克文, 秦泉寺敏正：日本応用磁気学会誌, **16**, 417 (1990).
- 4) 田島克文, 一ノ倉 理, 加賀昭夫：電気学会マグネティックス研究会資料, 福岡, MAG-96-54 (1996).
- 5) 田島克文, 加賀昭夫, 一ノ倉 理：電気学会論文誌 (A), **117**, 155 (1997).
- 6) W. Z. Fam and G. K. Bahl: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-10**, 690 (1974).
- 7) 田島克文, 一ノ倉 理, 加賀昭夫：電気学会マグネティックス研究会資料, 福島, MAG-95-23 (1995).

1996 年 10 月 15 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録