

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760193  
 研究課題名 (和文) 各種 PLL 適用時における自励式 BTB の動特性に関する研究  
 研究課題名 (英文) Study on the dynamic behavior of the self-commutated BTB system when different PLL circuits are applied.  
 研究代表者  
 萩原 誠 (HAGIWARA MAKOTO)  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
 研究者番号：20436710

## 研究成果の概要：

各種 PLL システムが自励式 BTB のグリッド変圧器・変換器用変圧器の直流偏磁現象、および電源電流・直流コンデンサ電圧変動に与える影響について、PSCAD を用いたシミュレーションより検討を行った。その結果、dq 変換をベースにした三相 PLL 回路が自励式 BTB に最も適していることを定量的に明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：系統連系, PLL, 系統事故, 自励式 BTB

## 1. 研究開始当初の背景

安定かつ高品質な電気エネルギーを供給する手段として、系統連系(電力会社間の電力融通)が挙げられる。一方、系統連系実現には直流送電や BTB(Back-To-Back)システムに代表される系統連系施設を導入する必要があり、特に自励式変換器を BTB に採用した自励式 BTB(Back-To-Back)システムは、その高機能性から注目を集めている。

一方自励式 BTB では、系統電圧の振幅・位相情報を得る技術として PLL(Phase Locked Loop: 位相同期回路)が一般的に用いられる。しかし、自励式 BTB に最適な PLL に関する検討は現在まで行われてこなかった。また、変

換器用変圧器に発生する直流偏磁現象は明らかになっていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、系統事故に起因する PLL の出力変動が自励式 BTB の動特性に及ぼす影響を明らかにすることである。初めに、系統事故が各種 PLL の出力変動に与える影響について検討する。次に各種 PLL 回路を自励式 BTB に適用し、PLL の種類・応答時定数が自励式 BTB の動特性に及ぼす影響について検討を行う。また PLL の出力変動が自励式 BTB の交流電流に及ぼす影響に関して、定量的な解析を行う。最後に、系統事故と BTB に用いてい

るグリッド変圧器の循環電流量に関して理論解析とシミュレーションの両者より検討する。

### 3. 研究の方法

研究は研究者の研究室で所属する電力回路用シミュレーションソフト「PSCAD/EMTDC」を用いて実現した。また各種理論解析の妥当性の確認には、数値解析ソフト「MATLAB」を使用した。

### 4. 研究成果

図1に本研究で検討した50-MW BTBシステムの構成を示す。BTBシステムは二台のBTBコンバータより構成され、各BTBコンバータは4台のダイオードクランプ形3レベル変換器と対応する変換器用変圧器から構成される。これは、2004年に関西電力(株)の神崎変電所にて運転開始した80 MVA STATCOM(自励式無効電力補償装置)と同構成である。研究者は50-MW BTBシステムに関して検討を行い、本研究開始前に一線地絡等の系統事故時にBTBシステムに発生する過電圧・過電流について定量的な検討を行い、理論近似式の導出に成功した。具体的には、以下の成果を得た

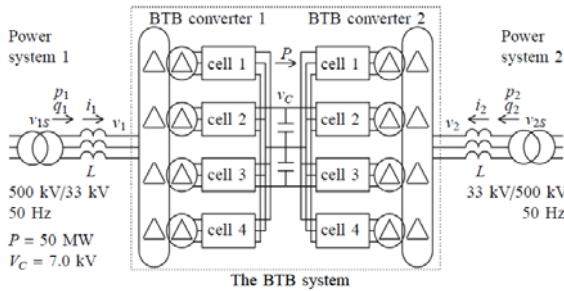


図1 50-MW BTBシステムの構成

(1) 各種PLLシステムが自励式BTBの変換器用変圧器の直流偏磁現象、および電源電流・直流コンデンサ電圧変動に与える影響について、PSCADを用いたシミュレーションより検討を行った。初めに、PLLシステムを理想状態と仮定し、一線地落時に変換器用変圧器で発生する直流偏磁現象について考察を行った。その結果、直流偏磁量を表す理論近似式の導出に世界で初めて成功した。

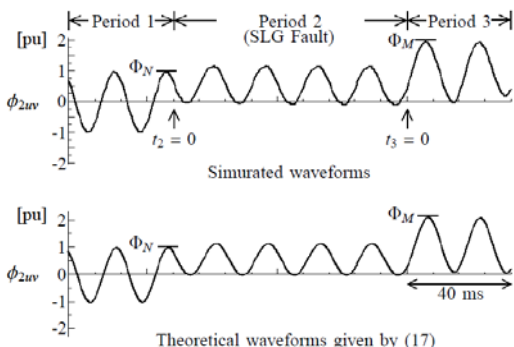


図2 一線地絡時の磁束変動

図2に一線地絡時に変換器用変圧器で発生する磁束変動を示す。上側がシミュレーション結果、下側が理論直線をそれぞれ示す。系統事故が発生すると磁束に直流量が重畳し、その結果直流偏磁が発生する。

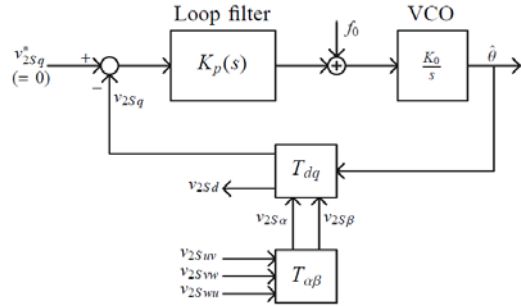


図3 直流偏磁量に関する理論とシミュレーションの比較

図3に本研究で導出した直流偏磁量の理論近似式とシミュレーションの比較を示す。横軸は系統電圧の電圧低下量を表し、 $A = 0$ は正常状態を、 $A = 1$ は電圧が100%低下した最も厳しい事故状態を表す。図3よりシミュレーションと理論はよく一致している。 $A$ が0.6以上の領域では両者の誤差が大きくなるが、これは変圧器の非線形性により過大な励磁電流が発生するためである。しかし $A = 0.6$ 以上の一線地絡事故は殆ど生じないため、本研究で導出した理論近似式は実用的に有用である。

この結果に関しては、電気学会産業応用部門誌(査読有)の2007年9月号に掲載された。また、当研究分野で最も権威のある論文誌であるIEEE Transaction on Power Electronics(査読有)に掲載が決定し、2008年3月号に掲載された。

次に、各種PLL適用時の自励式BTBの動特性に関して検討を行った。代表的PLLである単相PLL、三相PLLを適用した場合に関して検討を行った。

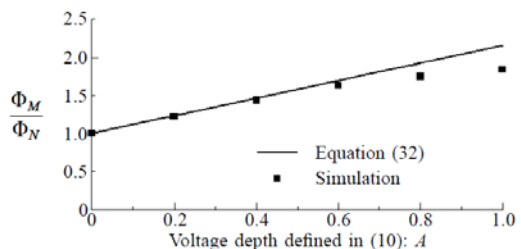


図4 三相PLLのブロック線図

図4に一般的な三相PLL回路のブロック線図を示す。三相電圧を検出し、dq変換した電圧情報に対してフィードバック制御を適用

することで位相情報を検出する一般的な方法である。一線地絡時の直流電圧変動・電源電流変動の解析を行った結果、一相 PLL を使用した場合に比べて三相 PLL を使用した場合の方が電圧・電流変動が抑制できることを明らかにした。これは、三相 PLL を使用した場合の方がより理想状態に近づけることができるためであることを明らかにした。

(2) 各種 PLL システムが自励式 BTB の変換器用変圧器の直流偏磁現象、および電源電流・直流コンデンサ電圧変動に与える影響について、PSCAD (電力回路用解析ソフト) を用いたシミュレーションより検討を行った。2007 年度の研究において研究者は、自励式 BTB 用の PLL としては三相 PLL が一番適していることを明らかにした。現在世界中で各種三相 PLL 方式が検討されているが、本研究では一番自励式 BTB 等の系統連系に適していると言われる dq 座標変換をベースとした三相 PLL 方式について検討を行った。

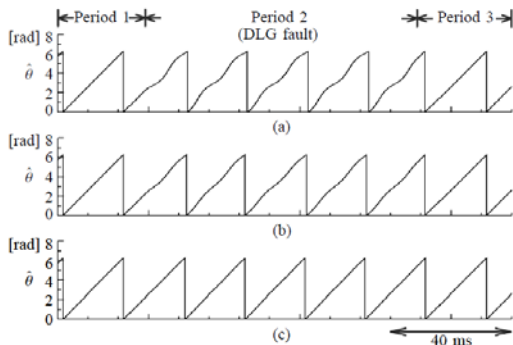


図 5 一線地絡時の位相情報の変化

図 5 に三相 PLL を適用した場合に系統事故が発生した場合の位相情報の変化を示す。PLL が出力する位相情報は正常時はノコギリ波状の波形となる。しかし、系統事故が発生すると図 5 に示すように二次周波数成分がノコギリ波に重畳する。本研究では系統事故時に PLL 回路に外乱として発生する位相変動 (二次成分) を定量的に表す理論近似式を世界で初めて導出した。

$$\delta = \frac{A}{2A - 3} \sin\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right)$$

上式は導出した理論近似式である。理論近似式より位相変動量が電圧変化量を表す変数 A のみの関数となることを明らかにした。また、位相変動と電源電流変動の関係についても同様に明らかにした。その結果、系統連系に適した PLL の制御ゲイン選定法を明らかにした。

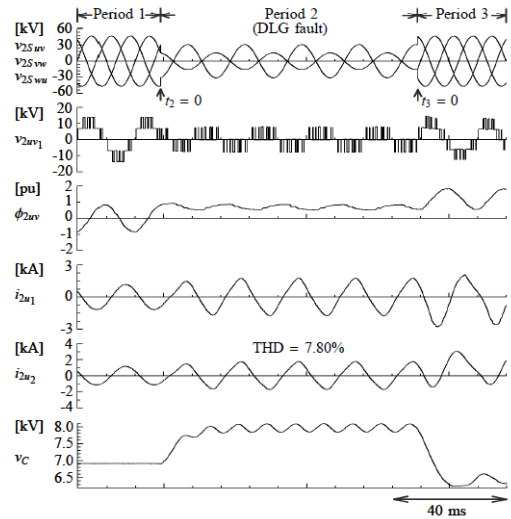


図 6 シミュレーション結果 1

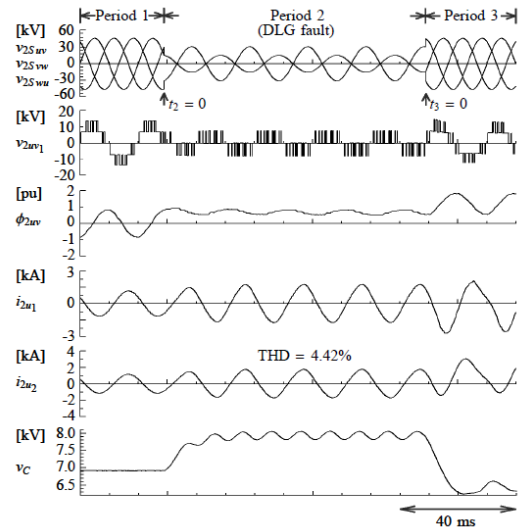


図 7 シミュレーション結果 2

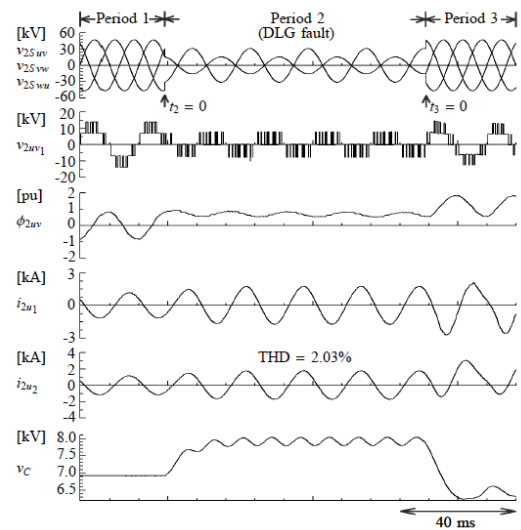


図 8 シミュレーション結果 3

図6から図8に二線地絡発生時のBTBシステムの挙動を示す。各波形は図5のPLLを適用している。シミュレーション結果よりPLLのフィードバックゲインが系統電流のTHDに与える影響に関して明らかにした。ゲインを適切に選ぶことで電流のTHDを改善できることを示した。また、フィードバックゲインが直流変動量に大きな影響を与えないことを明らかにした。なお、本研究結果は当研究分野で最も権威のある国際学会の一つであるIEEE PESC (査読有)にて発表を行った。

また、自励式BTBに使用しているグリッド変圧器に系統事故時に発生する循環電流に関して理論近似解析を行った。

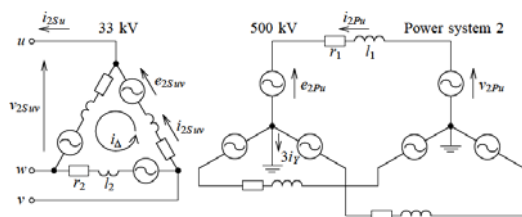


図9 グリッド変圧器の構成

図9に本研究で検討したグリッド変圧器の構成を示す。変圧器は一般的なY-Δ結線を仮定し、高圧側(500 kV)はY結線、低圧側(33 kV)はΔ結線とした。系統事故が発生すると、高圧側、低圧側ともに零相の循環電流が発生する。本研究では、循環電流を定量的に表す理論近似式の導出に世界で初めて成功した。

$$i_{\Delta} = \frac{\sqrt{2}V_s}{3\omega(l_1/k^2 + l_2)} A \cos \theta$$

上式は導出した理論近似式である。循環電流は電圧低下度を表す変数Aに比例し、グリッド変圧器の漏れインダクタンスに反比例することを明らかにした。

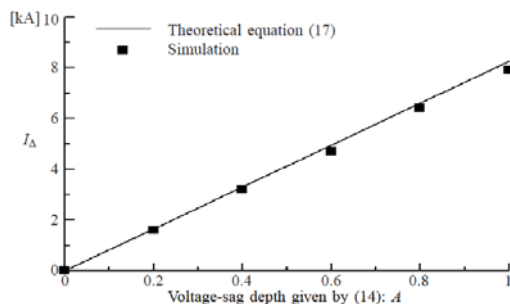


図10 循環電流に関する理論とシミュレーションの比較

図10に循環電流に関する理論とシミュレーションの比較を示す。横軸は電圧低下度を表す変数Aを、縦軸は循環電流の振幅をそれぞれ表す。全てのAの範囲において、理論とシミュレーションはよく一致している。

本研究成果に関しては当研究分野で最も権威のある学会誌であるIEEE PELS (査読有)に投稿中である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 萩原 誠, ファム フン ヴェト, 赤木 泰文, Calculation of DC Magnetic Flux Deviation in the Converter-Transformer of a Self-Commutated BTB System During Single-Line-to-Ground Faults, IEEE Transactions on Power Electronics, 23, 2, 698-706, 2008, 査読有
- ② 萩原 誠, ファム フン ヴェト, 赤木 泰文, 一線地落時に自励式BTBの変換器用変圧器に発生する直流偏磁現象の解明, 電気学会産業応用部門誌, 127 巻, pp.1013-1022, 2007 年, 査読有

[学会発表] (計1件)

- ① 萩原 誠, ファム フン ヴェト, 赤木 泰文, Effects of Phase-Locked-Loop Circuit on a Self-Commutated BTB System under Line Faults, IEEE Power Electronics Specialist Conference, 2008 年 6 月 17 日, ギリシャ

[その他]

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原 誠 (HAGIWARA MAKOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 20436710

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし