

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月19日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560267

研究課題名（和文） 同期発電機内部情報を活用した新しい電力系統解析モデルに関する基礎研究

研究課題名（英文） A New Analytical Model of Power Systems based on Inner Information of Synchronous Generator

研究代表者

松木 純也（MATSUKI JUNYA）

福井大学・大学院工学研究科・特命教授

研究者番号：90089110

研究成果の概要（和文）：本研究は、同期発電機内部の空隙磁束及び制動巻線電流に関する情報を積極的に活用した新しい電力系統解析モデルを構築して、電力系統の解析及び運用技術の高度化に資することを目的とした基礎研究である。主な成果は次の通りである。（1）従来計測が不可能であった制動巻線電流を実測して、電力系統過渡状態における同期発電機の制動巻線の効果を、物理的に明確にした。（2）、同期発電機内部空隙磁束を理論的に求めるモデルを構築し、その妥当性を実験で確認した。

研究成果の概要（英文）：This is a basic study on construction of a new analytical model of electric power system based on inner information such as airgap flux and damper current inside synchronous generator. Main results in this study are as follows: (1) Utilizing measured damper currents which have been impossible to measure, effects of damper windings on power system have been made clearer than before. (2) A new analytical model of airgap flux has been constructed and its validity has been checked by experiment..

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：電力系統、同期発電機、空隙磁束、制動巻線、TCS C

1. 研究開始当初の背景

現在の電力系統解析手法は、同期発電機をいわゆる Park の式で表現した電氣的等価回路表現に基づくものである。実系統での実験が容易でないことから、電力系統の運用に関する研究は、この解析法に基づくシミュレーション中心の研究となっている。しかしながらこの解析法は、周知のように次のような欠点を有している。

（1）シミュレーションに用いる機器定数の値には不確定要素が残っており、実系統の現象と合致させるために、試行錯誤的に値を決定せざるを得ない。

（2）従って、この解析法は全体的な見通しを与えるという点では強力な武器であるが、常に精度の点で信頼性が高くなく、特に過渡状態、さらにたとえば同期発電機が脱調するかどうかなどのシステムの限界点の見極め

において、必ずしも正確さが保証されない。

しかし、これに代わる有効な方法は見いだされていないため、広く用いられている。

他方、同期発電機内部の空隙磁束及び制動巻線電流は、電力系統に生起する現象に決定的な影響を与える量でありながら、従来は測定が容易ではないとして、ほとんど利用されていない。

研究代表者は、本学設置の三相同期発電機および模擬送電線設備を用いて構成した一機無限大母線系統における実験と解析において以下のような成果を上げてきている。

(1) 同期発電機脱調時の空隙磁束の変化を測定・解析して、脱調現象を物理的に明確にした。

(2) 電力動揺時の制動巻線電流を測定・解析して、電力動揺及び高調波抑制効果について明らかにした。

(3) 系統事故発生時の空隙磁束の変化を測定・解析して、事故電流の影響が空隙磁束にどのように現れるかを明らかにした。

以上に例示したように、研究代表者は、これまで、同期発電機内部の空隙磁束及び制動巻線電流の測定・解析により、同期発電機内部に埋もれている系統現象に関する情報を利用してこれまでになかった新しい知見が得られることを明らかにしてきた。これらの研究成果をさらに進展させ新しい電力系統解析モデルを構築することが出来れば、電力系統の解析・制御・運用技術の高精度化を図ることが出来るものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、従来ほとんど活用されていない同期発電機内部の空隙磁束及び制動巻線電流を積極的に活用した新しい電力系統解析モデルを構築して、電力系統の解析及び運用技術の高度化に資することを目的とした基礎研究である。

3. 研究の方法

上記研究目的を達成するため、本学設置の電力系統模擬実験設備を用いた実験と Park 式に基づくシミュレーションを用いた解析を併用しながら、以下の方法で研究を実施した。

なお本学設置の同期発電機は、以下のような特別仕様となっている。

①制動巻線の脱着が可能。

②各極5本の制動棒からなっており、本数の変更及び極間接続も切り離すことが出来る。

従って、制動巻線の有無による影響の違い、制動巻線の構成の変更が容易に出来る。

制動巻線電流の測定には、ロゴスキーコイルを用いる。また、同期発電機内部空隙磁束は、電機子歯頭部に巻いたサーチコイルを用

いて測定する。

(1) 電力系統に生起する諸現象の空隙磁束による表現の体系化

研究代表者は上記のように、発電機脱調時及び系統における三相短絡事故発生時の発電機内部の空隙磁束の振る舞いを明らかにしてきているが、さらに、様々な系統事故時の空隙磁束の振る舞いを測定・解析して、空隙磁束と系統現象の関係を整理する。

(2) 電力品質に関する系統の不均衡及び高調波歪みと制動巻線電流の関係の明確化

電力品質を表す高調波歪みや三相不均衡の度合いは、発電機の回転子とともに回転する制動巻線を通る電流上に現れる。制動巻線に生じる電流を計測して、両者の関係を明確にする。

(3) 空隙磁束及び制動巻線電流に関する情報を活用した新しい電力系統解析モデルの開発

以上の結果を総合すると、発電機内部の測定から、電力系統で生起している事故や不均衡や高調波等に関する有用な情報を一括して得ることが期待できる。これらの情報を活用した新しい電力系統解析モデルを開発する。

4. 研究成果

(1) 発電機端子における電圧、電流の計測とともに、様々な定常運転時及び系統事故時の空隙磁束の振る舞いを測定・解析して、空隙磁束の視点から見た系統現象に関するより包括的な表現方法を構築した。

(2) 制動巻線電流及び極間接続の解析は、制動巻線・極間接続の設置場所が同期発電機内部の回転子側であることから計測が極めて困難である。このため数値計算による解析が中心であり、実験による解析は十分に行われていないのが現状である。

そこで本研究では、まず定格運転時における同期発電機の制動巻線電流を測定した。次に系統における三相短絡及び二相短絡事故を想定し、事故継続状態(過渡現象終了状態)及び系統短絡事故復旧後における制動巻線電流の測定を行った。これらの結果をもとに、回転子及び固定子側での波形解析を行い、同期発電機過渡時において制動巻線が有するとされている以下に示す3つの効果について検証を行い、制動巻線の効果を確かめた。

①発電機過渡時において制動トルクを与え、位相角の変動の抑制と乱調の防止

②系統事故等の過渡時における高調波抑制

③界磁巻線に対する過渡時の影響の抑制

すなわち、同期発電機過渡時において制動巻線電流に現れる影響を実験により解析し、過渡時における制動巻線の効果(乱調防止効果、高調波抑制効果、界磁巻線への遮断効果)を示した。また、第3次高調波に着目するこ

とで、三相短絡事故と二相短絡事故の判別ができることが確かめられた。また上記のように対象同期発電機の制動巻線は毎極5本の制動棒で構成されている。本数を変えた場合、極間接続の有無による、制動巻線の効果も詳細に検討した。

このように、実際の制動巻線電流を測定してその効果を確かめることができた意義は大きく、今後制動巻線を用いて、過渡時の制御に活用していくことが期待できる。

(3) 近年の電気・エネルギー分野を取り巻く環境は、電力市場の規制緩和・自由化の進展や分散形電源の導入の増加などにより、大きく変化しつつある。このような環境下においては、配電系統における電力供給信頼度・電力品質の維持・向上が今まで以上に重要になっている。電力品質を劣化させる要因としては、三相不平衡・高調波・電圧変動等があるが、特に近年の分散形電源導入の増加により、三相不平衡の改善がますます重要になっている。

一般に、三相不平衡の改善策としては、単相負荷の接続替えによる相間負荷の平均化や、無効電力補償機器の設置など系統側による解消がほとんどであり、発電機側からのアプローチは殆どされていない。一方、同期発電機内部の制動巻線には不平衡時に逆相分を抑え、各相を平衡にする効果があると言われている。これは、制動巻線を設置することにより、発電機の逆相リアクタンスが小さくなり、発電機が系統の高調波分を引き受け、系統の三相不平衡が改善されるものである。

本研究では、電力系統に連系した状態における具体的な挙動について、制動巻線による三相不平衡の改善効果を実測を通して実験的に検証した。特に、分散形電源を電力系統に連系した場合に発生する三相不平衡が、同期発電機内部の制動巻線によって抑制可能かどうかを検証・評価した。

すなわち、一機無限大母線系統に分散形電源を設置し、分散形電源連系時における制動巻線電流分布の変化を示し、制動巻線電流と電機子電流、さらには不平衡時にあらわれる逆相電流との関係を明確にした。また、発電機側にある制動巻線によって分散形電源を接続することによって生じる系統側の三相不平衡を改善できることを実証した。

(4) 同期発電機内部の空隙磁束は、起磁力分布とパーミアンス分布の積で求められる。起磁力分布は、主として界磁電流が作る空間起磁力分布と電機子電流が作る空間起磁力分布のベクトル和である。またこれを理論的に求められるようにするためには、いわゆる直軸位置の決定が必要である。対象同期発電機の諸元から以上の各分布波形を数式表現し、直軸位置を考慮して空隙磁束を求めるための理論モデルを、Matlab/Simulinkシ

ミュレーションモデルとして構築した。

次に、同期発電機の定常状態及び電力系統事故時など数種類の運転および系統条件において、実験的に求めた空隙磁束波形と上記シミュレーションモデルによる空隙磁束波形がほぼ合致することを確認し、モデルは妥当であることを示した。

さらに、以上の方法を、電力系統に発生した事故の種類を空隙磁束から把握する手法として応用できることを実験及びシミュレーションで確認した。

(5) T C S C (Thyristor-Controlled Series Capacitor、サイリスタ制御直列コンデンサ)による系統安定度向上効果について、実験と解析を行った。すなわち、本学所有の模擬送電線設備において一機無限大母線系統を構成し、購入したDSPボードを用いたデジタル制御系によってT C S Cのパラメータをリアルタイムで調整することにより、系統安定度を向上させることができることを実証した。

また、T C S Cを構成するコンデンサ容量CとインダクタンスLの構成を種々変更して、一機無限大母線系統で、その効果の変化を実験的に検証した。LとCの組み合わせによっては不安定現象が発生する。またサイリスタ点弧角を適切に制御することにより系統安定度を向上させることができることを実験的に検証した。

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3件)

- ① 松木純也、田岡久雄、川崎章司、中嶋勇貴、保利免雅和、村松宏樹、送電系統事故把握のための発電機内部空隙磁束モデル構築に関する研究、電気学会論文誌B、査読有、Vol.132, No.10、2012、872-878
DOI:10.1541/ieejpes.132.872
- ② 松木純也、田岡久雄、林泰弘、岩本繁、大穀晃裕、同期発電機の制動巻線による分散型電源連系時の三相不平衡の改善、電気学会論文誌B、査読有、Vol.131 No.9、2011、724-729
DOI:10.1541/ieejpes.131.724
- ③ 松木純也、田岡久雄、林泰弘、岩本繁、大穀晃裕、同期発電機過渡時における制動巻線の効果の実機評価、電気学会論文誌B、査読有、Vol.131 No.5、2011、447-454
DOI:10.1541/ieejpes.131.447

[学会発表] (計12件)

- ① 保利免雅和、系統安定度向上を目的とし

たTCSCのコンデンサ容量の設定に関する考察、電気学会電力・エネルギー部門大会、2012年9月12日、北海道大学

- ② 保利免雅和、TCSCによる電力系統安定度向上効果の検証、電気関係学会北陸支部連合大会、2012年9月2日、富山県立大学
- ③ 保利免雅和、TCSCによる電力系統安定度向上に関する実験的研究、電気学会電力・エネルギー部門大会、2011年8月30日、福井大学
- ④ 岩本繁、一線地絡時の同期発電機制動巻線電流の効果に関する実験と考察、電気学会電力・エネルギー部門大会、2011年8月30日、福井大学
- ⑤ 中嶋勇貴、電力系統事故現象の発電機内部の空隙磁束による表現、電気学会電力・エネルギー部門大会、2011年8月30日、福井大学
- ⑥ Junya Matsuki, Firing Control of TCSC Adapted for Power System Stability Enhancement, Proceedings of 17th International Conference on Electrical Engineering, July 11, 2011, Hong Kong
- ⑦ Junya Matsuki, Verification of Effect of Damper Windings on Synchronous Generator Transient Condition, Proceedings of 17th International Conference on Electrical Engineering, July 11, 2011, Hong Kong
- ⑧ 中嶋勇貴、TCSCの点弧角切り替え制御による電力動揺抑制効果向上に関する研究、電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会、2011年3月7日、琉球大学
- ⑨ 岩本繁、同期発電機の制動巻線構成変更時の電流分布、電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会、2011年3月7日、琉球大学
- ⑩ 岩本繁、過渡期における同期発電機の制動巻線の効果の実験と考察、電力技術・電力系統技術一般合同研究会、2010年9月30日、広島大学
- ⑪ 中嶋勇貴、TCSCによる定態安定度向上効果の検証、電気関係学会北陸支部連合大会、2010年9月11日、福井工業高等専門学校
- ⑫ Junya Matsuki, Damping effect of Power Oscillation by TCSC, Proceedings of 16th International Conference on Electrical Engineering, July 12, 2010, Busan Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松木 純也 (MATSUKI JUNYA)

福井大学・大学院工学研究科・特命教授

研究者番号：90089110

(2) 研究分担者

田岡 久雄 (TAOKA HISAO)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30367502