



風力発電の拡大に寄与する電力系統解析技術

Power Grid Analysis Technologies Contributing to Wind Power Expansion

濱崎 晃旗*

Koki Hamasaki

飯村 匠

Takumi Iimura

黒田 和宏

Kazuhiro Kuroda

安達 哲也

Tetsuya Adachi

長崎 則久

Norihisaki Nagasaki

植村 浩之

Hiroyuki Uemura

再生可能エネルギーとして導入が進む風力発電、特に大規模ウインドファーム (WF) システムでは、風車の設置場所が変電所から遠方となることが多い。WFから変電所へ送電する交流ケーブルが長距離となる場合、その静電容量に起因する特異現象が発生するリスクが高まる。本稿では、WFシステムを構成する変圧器などの鉄心機器と、ケーブルの静電容量との相互作用により生じる特異現象について紹介し、電力系統解析技術によりそれらのシミュレーションを事前に実施することで、WFシステムの安定運用実現に貢献できることを示す。また、小型変圧器を用いた特異現象の検証結果を紹介する。

Wind power generation is being increasingly adopted as a renewable energy source. Especially in large-scale wind farm (WF) systems, turbine sites are often located far from substations. When long AC cables are installed, the risk of abnormal phenomena occurrence increases due to the cable capacitance. This paper introduces the interactions between iron-core equipment, such as transformers, used in the WF system, and cable capacitance. Furthermore, this paper shows the contribution of simulations in advance by power grid analysis technologies to realize stable operation of the WF system. Additionally, results of experiments validating abnormal phenomena, using a small transformer, are presented.

キーワード：風力発電、長距離ケーブル、系統解析、電流零ミス、励磁突入電流

1. 緒 言

2025年2月に閣議決定された第7次エネルギー基本計画では、発電電力量における再生可能エネルギーの割合を2022年時点の約20%程度から2040年までに40~50%まで拡大する見通しとしている⁽¹⁾。我が国ではこれまで太陽光発電を主体として導入が進んできたが、風力発電 (WF) も有望区域や準備区域が多数存在しており注目を浴びている⁽²⁾。

一方で、再生可能エネルギーの大量導入による電力品質低下のリスクが危惧されている。大規模なWFの実施例は少なく、これらを未然に防ぐための検証は運転データが不足しているため困難であり、系統条件を元にシミュレーション解析を行い、課題を抽出して対策案を検討する系統解析技術の役割は、今後ますます重要となる。

当社の系統解析技術は、高調波フィルタや電力用コンデンサといった調相・電力品質対策機器に関する回路現象の解明に多くの実績があることが強みである。この技術を活用して、電気回路上で発生する特異現象を事前に予測し、適切なシステム構成（機器の配置・容量など）・運転方法を提案し、安全で安定したシステム運用に貢献している。

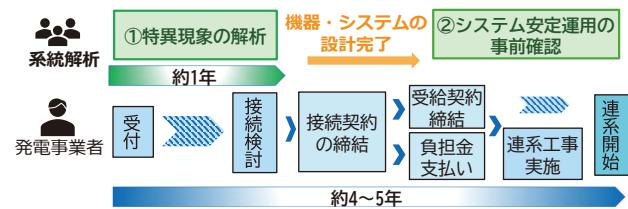
本稿では、大規模WFシステムにおける系統解析について解説する。2章では、大規模WF連系時に必要となる解析の特徴を示す。3章では、系統連系に用いるケーブルが長くなることで顕在化する特異現象の1つである電流零ミス現象について、実施する解析の内容を示す。4章では、

WFシステムの安定運用向けの事前確認検討において、重要な要素の1つである変圧器の励磁突入電流について解説する。5章では、3章、4章で解説した回路現象について、検証用小型変圧器を用いた検証結果を紹介する。

2. 風力発電 (WF) システムの系統解析の特徴

近年、100MWクラスの大規模WFの導入計画が増えており、運転に至るまでに多くの技術的な検討が必要となっている。その内容は、主に特異現象に関する解析やシステム安定運用の事前確認（図1）、ならびに機器製作や現地検証による効果・性能評価であり、これらの検討を系統解析技術を活用して実施することができる。

図2に大容量の陸上WFのシステム例を示す。大容量の陸上WFは、風況の良い適地に設置されるため、既設送電



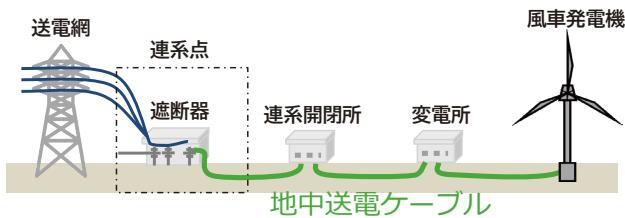


図2 WFシステム例

線又は電力会社変電所の連系点まで長距離化する傾向にある。そのため風力発電事業者が、風車から連系点まで自営線を敷設することが多い。敷設にあたり、架空送電に比べて用地制約が少なく、工期短縮が可能な地中送電・長距離交流ケーブルの採用が行われるが、これに伴い、長距離交流ケーブル特有の技術課題が顕在化してきている。

また、前述の通りWFの建設は風況の良い地域に集中するため、複数のWFが電力系統の同一母線上に接続される状況が発生すると推測される。そのため、今後は個別のWFシステムだけではなく、近接する他のWFシステムの影響も考慮する必要が生じると予想される。これらの課題は、今後の拡大が期待される洋上WFではさらに複雑化して生じるものと想定している。

当社グループでは、ケーブルと受変電設備のトータルソリューションを提供しており⁽³⁾、これら課題のメカニズム解明・対策提案に向けて、これまでに培ってきた系統解析技術を駆使して取り組んでいる。

3. 大規模WFシステムの特異現象の解析

図3に図2の風力発電システムを電気回路上に示した場合の主要機器の構成例を示す。電力系統と風車発電機を送電ケーブルで連系し、ケーブルの進み無効電力を補償するため、正相用は分路リアクトル（ShR）、零相用は中性点補償リアクトル（NGL）を連系開閉所に設置する。また、高調波共振対策として高調波フィルタを設置し、副次的に生じるフィルタの進み無効電力もShRによって補償する。

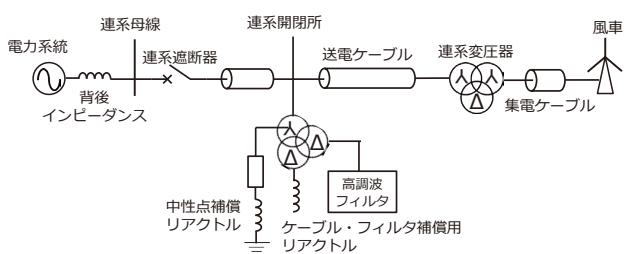


図3 WFシステムの回路例

図4に風力発電の送電に使用されるCV（架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース）ケーブルの構造図を示す。同心円状に複数の層によって形成されており、主には電流が通る経路である芯線（導体）、芯線を電気的に絶縁して芯線以外に電流が流れないようにする絶縁体、芯線から発生する電界を外部に出さないように遮蔽する金属シース（遮蔽層）で構成される。芯線と金属シースの2つの電極が対面した構造であり、ケーブルへの電圧印加時に正負の電荷が双方の電極に蓄積される。これより電力ケーブルは、電力系統から見るとコンデンサと同じ働きを行うことになる。

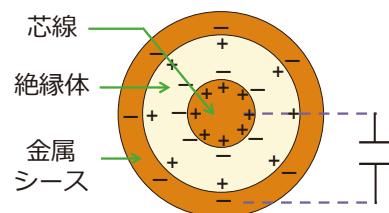


図4 ケーブルの構造図

表1に長距離ケーブル連系によって生じる特異現象一覧を示す。新設のWFを電力系統と連系する際、WFが上位系統に影響を及ぼさないよう、事前に発電事業者側で検討・対策する必要がある。当社が系統技術を活用して特異現象の解析を行う場合は、表1の各項目について検討を行い、対策が必要な場合、対策機器や運用を提案できる。

表1 長距離ケーブル連系時の特異現象一覧

現象	影響
高調波共振 ⁽⁴⁾	・需要家機器の過熱・騒音 ・(共振による)過電流
ケーブル静電容量による電圧上昇	・電力会社による連系母線電圧規制値の超過 ・ケーブルの耐電圧超過による絶縁劣化
電流零ミス現象（3-1節）	・電流零点を迎えない期間の発生による遮断失敗 ・遮断器端子の損耗
ケーブル残留電圧	・残留電圧がある状態での遮断器投入による機器の損傷

3-1 短絡電流零ミス検討

本節では、表1に示した特異現象の内、連系母線での短絡故障発生時に遮断器が遮断できなくなる短絡電流零ミス現象と、そのシミュレーションについて解説する。

回路内にShRやNGLなどのリアクトルが設置されている場合、故障発生時・リアクトル投入時のタイミングによって、リアクトル電流に過渡直流分が重畠する。WFのようにケーブル充電容量をリアクトルで補償する場合、上記直

流分が連系遮断器（連系CB）を通過し、電流が零点を交差しないことから遮断器が遮断できなくなる可能性がある。これを電流零ミス現象と呼ぶ⁽⁵⁾。

本検討では、短絡故障発生時に連系CBを遮断可能かどうか（電流が零点を交差するか）を確認する。尚、電流零ミス検討時は過酷条件として、風車発電機からの発電電流が連系点に流れない風車停止時を検討することが多い。

(1) 原 理

図5に短絡電流零ミス現象のイメージを示す。連系点で短絡故障が発生した場合、図5中段の波形のようにケーブル補償用ShRに蓄えられたエネルギーが故障点に向かって直流減衰性の電流となり放電される。

風車停止時において、WFは短絡故障により系統側から切り離されているため風車や系統から交流分が供給されず、ケーブルの電荷放電によって発生する過渡振動電流と直流性の電流のみが連系点CBを通過する。これにより、電流が零点を通過しない期間が発生する。

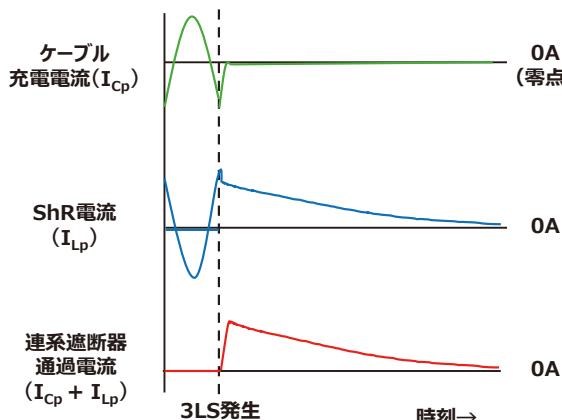


図5 短絡電流零ミス発生時の電流の様相

(2) 解析例

システム構成図や系統・WF構内の設備定数を用い、過渡現象解析ソフト上に電気回路を模擬する。連系母線上で短絡故障を発生させ、連系CBを通過する電流が零点を通過するまでの時間を確認する。

解析例として図3の回路構成で連系母線にて3相短絡(3LS)が発生した際、ShRを設置した連系開閉所の変圧器1次側電流と、連系CB通過電流を図6に示す。原理の項で説明したように、故障点に向かってShRに蓄えられたエネルギーが直流性の電流となって故障点に向かって流れることが確認できる。この直流性の電流はShRと故障点の間のインダクタンス成分と抵抗成分で減衰時間が決定する。

また、解析例では、直流性の電流に加え、連系CB通過電流にはケーブルの電荷放電によって発生する過渡振動成分が重畠している。

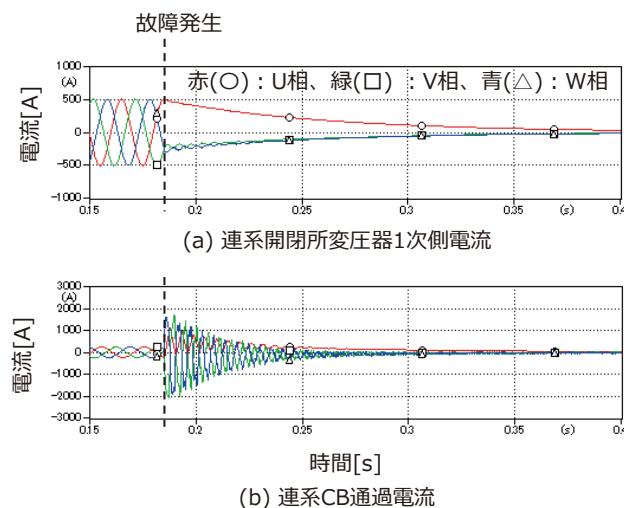


図6 短絡電流零ミス発生時の解析結果

短絡零ミスをはじめとする電流零ミス現象について、過渡振動電流は連系CB通過電流が零点を通過する時間に大きく影響する。この振動電流は回路上のインダクタンス・キャパシタンス要素によって様相が変化する。当社が持つ実回路に関する知見を駆使することによって実系統で発生する回路現象の予測が可能となる。

4. システム安定運用向けの事前確認

大規模WFのようなシステム導入における安定運用には通常運転時に加えて特殊な状況での検討が必要となる。表2にシステム安定運用向けの事前確認項目例を示す。その1つとして設備起動時、瞬時電圧低下（瞬低）・復電時に発生する過電圧・過電流による影響の確認がある。ここでは、定常計算だけでは確認が難しい、回路上の非線形特性を考慮した場合の過電圧・過電流の様相を過渡現象シミュレーションにより確認する。

表2 システム安定運用向けの事前確認項目例

項目	確認事項
設備起動時の過電圧・過電流	励磁突入電流(4-1節)、振動電流、
瞬低・復電時の過電圧・過電流	雷擊による
鉄塔への雷擊 (架空区間がある場合)	・設備の絶縁耐量への影響 ・遮断器のリレー動作への影響

4-1 電圧印加時に発生する励磁突入電流の影響

本節では、設備起動時、瞬低・復電時において過電流の要因の1つとなる励磁突入電流を取り上げる。この電流は変圧器に電圧を印加した時に流れる、変圧器の定格電流の十倍以下程度の過渡電流を指す。WF連系時の励磁突入電

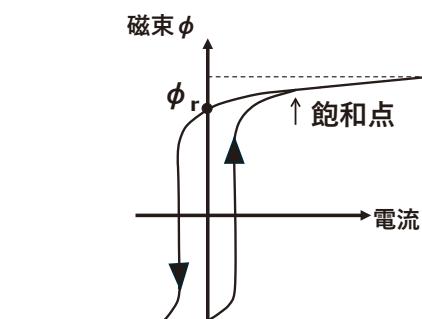
流による影響の確認事項は以下となる。

- ・設備の過電流耐量への影響
- ・過電流による保護リレー動作への影響
- ・力率改善コンデンサ／高調波フィルタなどへの流入電流の拡大

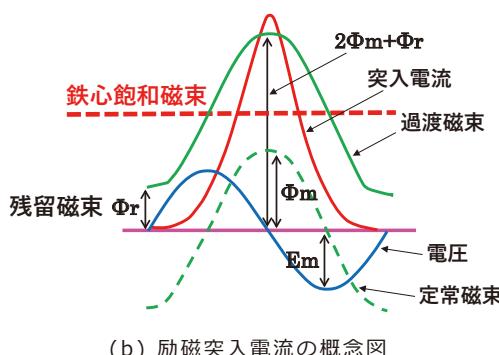
(1) 原理

図7に励磁突入電流が発生するメカニズムを示す。残留磁束 Φ_r は変圧器遮断後に鉄心内に残る磁束である。電流零点で遮断した場合、図7(a) の Φ_r の磁束が残留磁束となる。磁束は電圧の積分で求まるため、電圧零点で変圧器を投入すると磁束の大きさが最大（定格の2倍）となる。この時に残留磁束の分も加算され、磁束が鉄心の飽和点を超過することで急激に電流が大きくなる。図7(b) のように定常磁束の2倍の磁束 + 残留磁束が磁束の最大値になる。

当社が検討対象とする特別高圧の変圧器では、抵抗が小さい系統の場合、励磁突入電流は数秒間継続する可能性がある。



(a) ヒステリシスループ (I-Φ特性)



(b) 励磁突入電流の概念図

図7 励磁突入電流のメカニズム

(2) 解析例

電流零ミス検討時と同様に解析ソフト上で模擬した回路により励磁突入電流の影響を確認する。図3の連系開閉所変圧器を投入した時の変圧器1次側のCBを流れる電流を図8に示す。励磁突入電流が機器耐量以内に収まるか、保護リレー動作に影響を及ぼす可能性があるかをシミュレー

ション結果より判断する。

励磁突入電流の対策としては、突入電流抑制装置のような位相制御投入や抵抗投入が考えられる。その他、励磁突入電流が関係する現象として以下についても注意する必要がある。

- ・変圧器の△結線における助成効果の影響 (5-2節)
- ・WF 近傍に設置された $L=6\%$ コンデンサへの励磁突入電流成分の流入

当社が持つ変圧器・リアクトルメーカーとしての回路現象への知見により、精度の高いシミュレーションによる事前検証が可能となる。

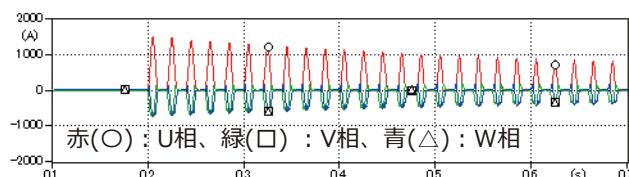


図8 連系開閉所変圧器投入時に1次側の遮断器を流れる電流

5. 変圧器実器ミニモデルを用いた検証

風力発電システムは、一般的には前述のとおり大規模なシステムとなるため、シミュレーションで各種解析を行う必要がある。解析に使用する瞬時値解析ソフトは回路計算手法も確立されたものであり広く世界各国で使われているが、実際に実器モデルにて実測と比較検討することも重要である。特に変圧器は鉄心と巻線からなる単純な構成だが、鉄心の飽和により特性が変化する非線形性を有しており、完全な模擬は難しい。そのため、鉄心機器に関する検討項目を実測で確認できるようにミニモデルを製作している。

ミニモデルを活用した検証として、3-1 短絡電流零ミス現象と4-1 励磁突入電流を実器で確認した例を紹介する。

5-1 短絡電流零ミス確認試験

図9に実器試験回路を示す。これは、図3から変圧器と ShR を抜粋したものになる。

解析上は、ShR から故障点へ直流性の電流が流れることで、連系CBにて電流零ミスが発生する。しかし、変圧器は

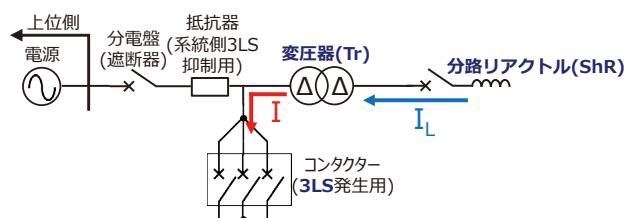


図9 短絡電流零ミス試験回路

電磁誘導によって 1 次側から 2 次側に電流を渡すため、変化しない純粋な直流であれば原理上、電流が通過できない。ここで、ShR から発生する直流性の電流についても、変圧器の影響で連系 CB 側に流れなくなる場合、短絡零ミス対策が不要となる。よってミニモデルを用いた実測で確認し、対策の要否を検討した。

(1) 検証器の構成

表3に、本試験で使用する機器の回路定数を示す。各種検討用に変圧器は結線を自由に変更できるようにしてある。

表3 回路定数一覧

機器	項目		
	結線	Δ - Δ	
三相変圧器 100V/100V	容量	1.75	kVA
	巻線抵抗 (1次+2次) R	103	mΩ
	漏れインダクタンス L	0.296	mH
	分路リアクトル (ShR)	巻線抵抗 R	125
	インダクタンス L	14.6	mH

(2) 試験結果

図10に、試験結果の電流電圧波形を示す。3LS により電圧が零になった $t = 0\text{ms}$ から、ShR にて直流性の電流が流れ、遮断器電流側も同様の電流が流れていることがわかる。これは、一定の直流ではなく変圧器で磁束の変化が起きているためである。よって、変圧器が存在しても ShR から直流性の電流は流れ、故障タイミングによっては電流零ミスが発生すると考えられる。

また、減衰時定数 τ については、R、L の実測値から以下のように求められる。

$$\tau = L/R = (14.6 + 0.296) / (125 + 103) = 65\text{ms}$$

故障が発生した瞬間 ($t = 0\text{ms}$) の遮断器電流は 8.8Ap であり、時定数の定義より、振幅が 36.8% の 3.2Ap となるタイミングを波形から読み取ると 70ms となり、1割程度の誤差となる。この結果から、試験結果が妥当であり、減衰時定数も精度よく求められることがわかる。

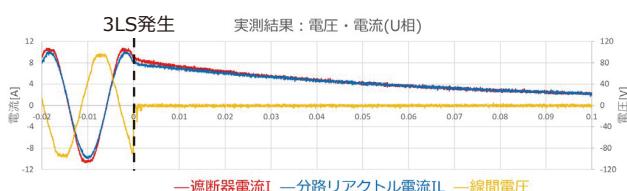


図10 短絡電流零ミス試験結果波形

5-2 励磁突入電流試験 ~ Δ 巻線の助成効果~

Y- Δ 結線された変圧器では、Y 結線側の鉄心が飽和し励磁突入電流が発生した場合に助成効果によって Δ 結線側にも励磁突入電流の $1/2$ 倍の電流が流れることに注意して Δ 結線側の容量を決める必要がある。本節では、励磁突入電流に関係する現象の 1 つである、 Δ 巻線の助成効果についてミニモデルにて確認した結果を紹介する。

三相変圧器では、U 相が電圧零の位相で投入された場合、他相は、位相が 120° ずれていることから励磁突入電流は U 相と比べて少ないと考えられる。ここで中性点非接地系統にて Y 結線側から電圧を印加し U 相のみ鉄心飽和した時、励磁突入電流の経路は図11 のようになる。

U 相の励磁電流を I とすると、系統から流入する U 相の励磁突入電流は $2/3 \cdot I$ となり、その電流は $1/2$ ずつに分かれ V 相、W 相に流れ込む。しかし、この 2 相は磁気飽和していないので突入電流のような励磁電流を必要としない。したがって、V 相、W 相では $1/3 \cdot I$ の電流によるアンペアターンを打ち消すような電流が非投入巻線である Δ 結線中を流れれる。

Δ 結線内の電流は循環して励磁突入を発生している U 相にも流れ、 Δ 結線からアンペアターンを供給する。U 相では Δ 結線中を循環する電流 ($1/3 \cdot I$) と、線路から流入する電流 $2/3 \cdot I$ の和が励磁電流 (=図11 の I) となれば良いため、Y 結線に流入する U 相励磁突入電流は $2/3 \cdot I$ となる。

すなわち、Y- Δ 結線三相変圧器の Y 結線側から三相電源に投入したとき、1 相だけ鉄心飽和した場合に、その相の線路に流れる励磁突入電流の大きさが励磁電流の $2/3$ 倍となる現象を Δ 結線の助成効果と称す⁽⁶⁾。

ミニモデルでは 3 相投入時の各相の磁束、電流と Δ 結線電流を測定した。

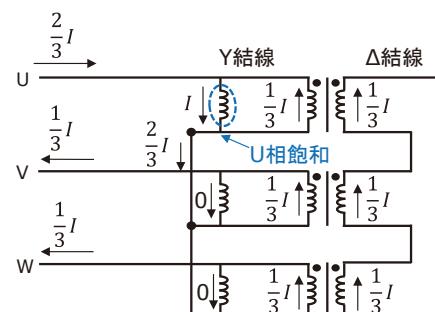


図11 Δ 結線助成効果説明図

(1) 検証器の構成

図12 に試験回路図を示す。5-1節の試験と同一の変圧器を使用する。結線は Y- Δ へ変更する。U 相の磁束が最大となる $V_u = 0\text{V}$ のタイミングで遮断器を投入する。

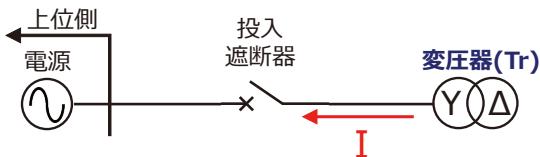


図12 励磁突入電流試験回路図

(2) 試験結果

図13に、試験結果の磁束（電圧の積分値）と電流波形を示す。例としてU飽和ピークの破線部分に注目すると、飽和した相の線電流に対して他相の線電流は約1/2倍となる。また、△巻線には飽和していない相のアンペアターンを打ち消す電流が流れることが確認できる。但し、本試験では3相を一括投入したこと、1相が飽和している期間に他相も飽和する。このため、V、W相電流には飽和分の電流と△巻線内電流の合算値が現れており、△巻線内の電流と相電流は一致しておらず、上記の原理解説と差異が生じている。これはV、W相の飽和領域においても同様の波形が確認できる。

通常の変圧器では△結線内の電流を確認できないような構造になっているため、今回確認した結果は、実際に助成効果を検証できた貴重な試験結果となる。

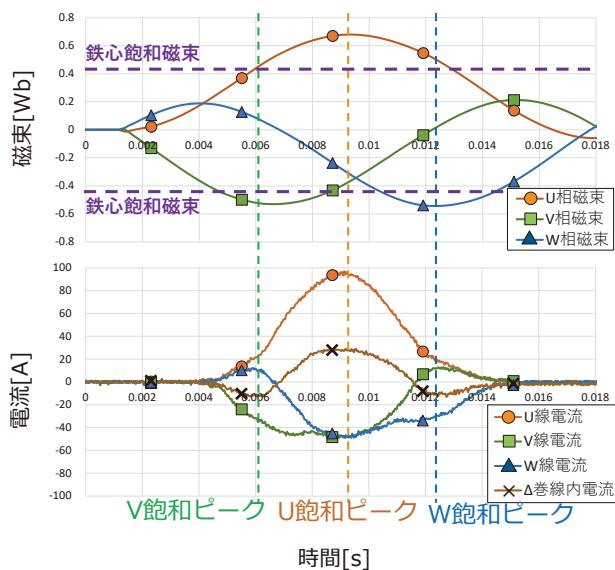


図13 励磁突入電流試験結果波形

今後更なるWFの増加による系統特性の複雑化や、大規模洋上WFの連系によるケーブル長距離化が予想される。系統解析技術により、今後もWFシステムにおける課題を抽出し、運用・対策を検討することで風力発電の拡大に寄与していく所存である。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁、「エネルギー基本計画の概要」、p.9 (2025年)
- (2) 資源エネルギー庁、「今後の再生可能エネルギー政策について」、p.21 (2025年)
- (3) 太田一雄、真山修二、田中未来、「再生可能エネルギー大量導入に向けた電力ケーブル系統設計技術」、住友電工テクニカルレビュー第199号 (2021年)
- (4) 田中康博、植村浩之、長崎則久、黒田和宏、荻原義也、真山修二、太田一雄、「最近の高調波問題と対策について～再エネ主力電源化を迎えて～」、住友電工テクニカルレビュー第203号 (2023年)
- (5) 「電力機器と系統保護の相互協調」、電気学会技術報告、第898号、pp.114-117
- (6) 「電力機器と系統保護の相互協調」、電気学会技術報告、第898号、pp.77-78

執筆者

濱崎 晃旗*：日新住電エネルギーシステム開発センター



飯村 匠：日新住電エネルギーシステム開発センター



黒田 和宏：日新住電エネルギーシステム開発センター
部長



安達 哲也：日新電機(株) 室長



長崎 則久：特別フェロー
日新電機(株) 部長



植村 浩之：日新電機(株) 参与



*主執筆者

本稿では、当社の系統解析技術がWF連系時の安定運用に貢献することを長距離ケーブル連系時の特異現象の検討、システム安定運用向けの事前確認検討を例に解説した。

6. 結 言

本稿では、当社の系統解析技術がWF連系時の安定運用に貢献することを長距離ケーブル連系時の特異現象の検討、システム安定運用向けの事前確認検討を例に解説した。