

# 再生可能エネルギー導入拡大に向けた 系統連系解析

■ 森 佑介  
Yusuke Mori

■ 滝澤 明広  
Akihiro Takizawa

太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギーは、低炭素社会を実現するために重要なエネルギー源であり、今後も導入が加速すると想定される。再生可能エネルギーの導入にあたっては、電力系統に連系するうえでの技術的課題を事前に検討し、電力系統や受変電設備に悪影響を与えないシステムを構築する必要がある。そのためには、系統解析技術を活用し、系統連系上の技術的課題の評価や対応策を検討することが重要である。本稿ではその一例として、再生可能エネルギーが長距離ケーブルで連系された系統の残留電荷放電現象および電流零ミス現象を解析した事例について紹介する。

## 1 はじめに

太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギーは、低炭素社会を実現するために必要不可欠なエネルギー源である。日本では2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、これを踏まえて「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。このなかでは、電力部門の脱炭素化は大前提としており、再生可能エネルギーを最大限導入することが記載されている<sup>(1)</sup>。特に洋上風力は成長分野としてあげられており、今後は日本においても導入が進むと思われる。

このような変化が生じていくなかで、信頼性の高い電力供給を維持するためには、電力系統や受変電設備に悪影響をおよぼさないよう、技術的課題を事前に検討し、必要に応じた対策を講じることが重要である。例えば、洋上風力の導入が進むと長距離ケーブルで系統連系するケースの増加が想定されるが、その際は長距離ケーブルの静電容量に起因する残留電荷放電現象や電流零ミス現象などについて検討する必要がある。

残留電荷放電現象や電流零ミス現象など、系統連系上のさまざまな技術的課題に対して、系統解析技術を活用することで効果的な検討を行い、適切な対策を講じることができる。本稿では、ATP<sup>注1)</sup>を使用して、長距離ケーブルで連系された系統の残留電荷放電現象および電流零ミス現象を解析した事例を紹介する。

## 2 長距離ケーブル連系の検討事項

再生可能エネルギーの電力系統への連系においては、電力系統や受変電設備に影響がないことを事前に検討し、対策を講じる必要がある。検討事項の一例として、電圧上昇対策や発電出力変動に伴う電圧変動などがあげられる。そのほかにも、発電設備が電力会社の変電所から離れている場合、大きな静電容量を有する長距離ケー

ブルで連系するため、次の現象について事前の検討が必要となる。

### (1) 残留電荷放電現象

図1のように、長距離ケーブル系統で遮断器が開放されると、ケーブルの静電容量に電荷が残留する。電荷が残留した状態で再閉路を行うと、投入位相によっては過電圧が発生する。したがって、残留電荷は再閉路時間よりも短時間で速やかに放電されることが望ましい。また、残留電荷は計器用変圧器などの接地機器を通して放電されるが、その際に発生する熱や電磁力により機器が破損しないことも確認する必要がある。

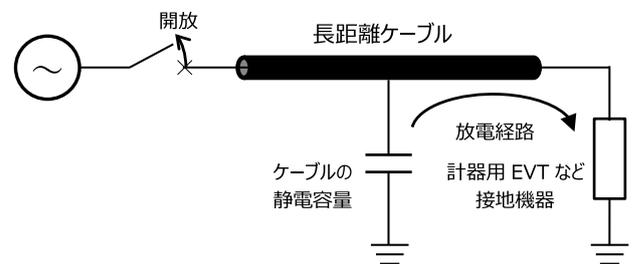


図1 残留電荷放電現象の回路概略図

### (2) 電流零ミス現象

電流零ミス現象とは、地絡などによる事故電流が電流零点とクロスしなくなる現象である。電流が零にならないため、この期間は事故電流を遮断できなくなる。電流零ミス現象の発生メカニズムを以下に記載する。

長距離ケーブル系統においては、リアクトルに流れる励磁突入電流とケーブルの充電電流の影響で電流零ミス現象を生じることがある。図2は電流零ミス現象が生じる回路の概略図である。同図のとおり、電源投入時に①励磁突入電流（過渡直流電流を含む遅れ電流）と②ケーブル充電電流（進み電流）の総和が③遮断器に通電する。このときの各部に流れる電流波形のイメージを図3に示す。遮断器に流れる電流は、励磁突入電流に逆位相の充電電流が重畳することで、過渡直流分を有する振

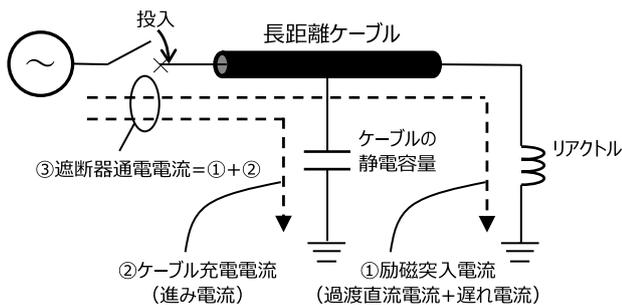


図2 電流零ミス現象の回路概略図

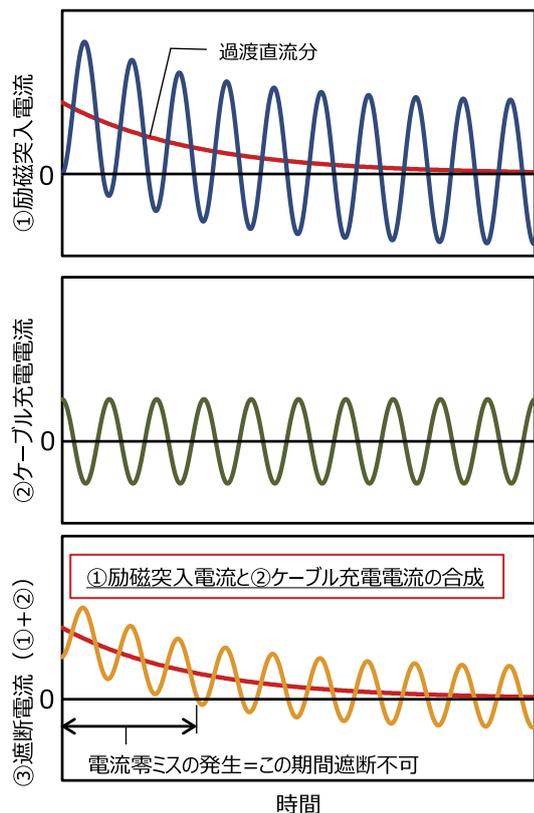


図3 電流零ミス現象における電流波形イメージ

幅の小さな電流波形となる。これにより、電流が零点を交差しない電流零ミス現象が生じ、この期間は電流を遮断できない。そのため、電流零ミス現象が長時間継続すると、定格遮断時間内に電流を遮断できないおそれがある。

(3) 高調波共振現象

長距離ケーブルにより静電容量が大きくなると、電力系統のインダクタンスとの共振周波数が低下する。共振周波数が第五次高調波 (250 Hz or 300 Hz) や第七次高調波 (350 Hz or 420 Hz) に等しくなると、電力系統に含まれる高調波が拡大し、高調波環境目標レベル<sup>注2)</sup>を超える可能性がある。

ここまで述べた各種現象のなかには、鉄心飽和や残留磁束などインダクタンスの非線形性が絡む複雑な現象もある。このような現象に対して、系統解析技術を活用す

ることで、効果的な検討を行い、適切な対策を講じることが可能となる。

3 解析事例

本章では、前述の残留電荷放電現象と電流零ミス現象の解析事例について紹介する。解析には ATP を用いた。

3.1 残留電荷放電現象の解析事例

図1のような系統を ATP でモデル化し、残留電荷放電現象を解析した。ここでは、一線地絡時の最大電圧に相当する電荷がチャージされた状態を想定し、残留電荷放電に伴う残留電圧の変化を解析している。図4の解析結果に示すとおり、対策前の解析では残留電圧の減衰が緩やかであった。そのため、中性点接地抵抗を調整し、残留電圧を速やかに減衰できる条件を解析により求めた。対策後は 0.3 秒程度で残留電圧がほぼ 0 になっている。この時間は自動再閉路時間よりも短いため、再閉路時に過電圧が発生するリスクは低いと判断できる。

なお、残留電荷の影響としては放電時間だけでなく、機器によっては放電電流による発熱や機械的強度への影響も検討する必要がある。発熱の影響については、ケーブルにチャージされるエネルギーから機器の温度上昇を見積もることができる。機械的強度への影響については、ATP で求めた残留電荷放電電流をもとに、磁場解析で電磁力を計算することで機器の破損や変形の有無を検討できる。

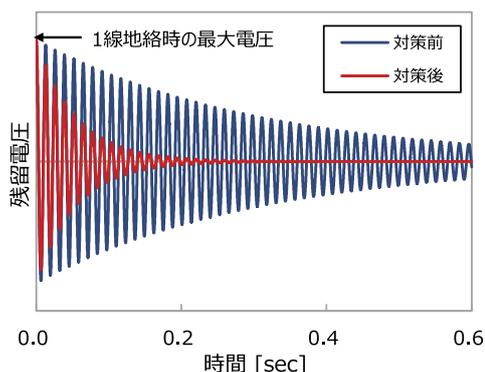


図4 残留電圧解析結果

3.2 電流零ミス現象の解析事例

図5は電流零ミス現象を解析した系統のイメージ図である。系統連系中に発電設備内で1線地絡が生じた際の電流を解析した。本解析では、変圧器の励磁特性が入力されており、非線形性を考慮している。また、同図に示すとおり、変圧器の中性点に補償リアクトルのみ接続した場合と、直流分を速やかに減衰させるため抵抗を直列に挿入した場合の解析を行った。

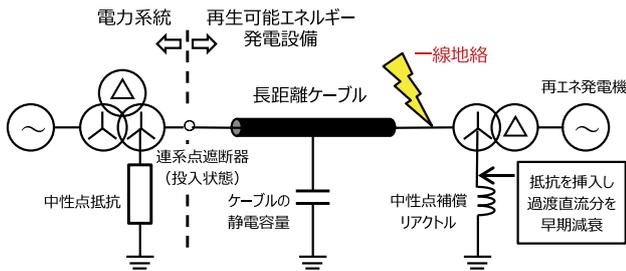
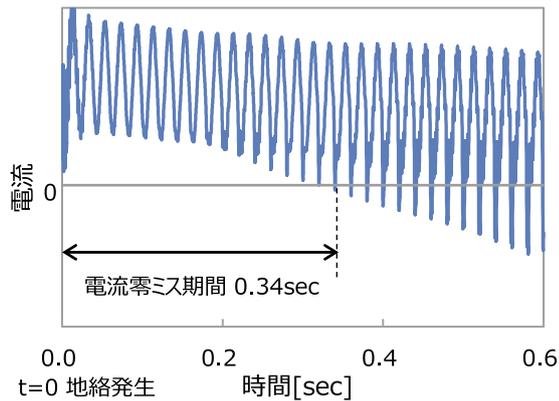
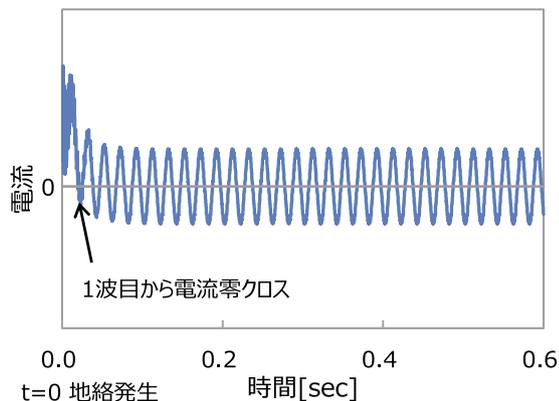


図5 電流零ミス現象を解析した系統のイメージ図



(a) 中性点補償リアクトルのみ (対策前)



(b) 中性点補償リアクトル+直列抵抗 (対策後)

図6 電流零ミス現象解析結果

図6(a)は、中性点に補償リアクトルのみ接続した場合の解析結果であり、健全相に流れる電流波形を表示している（事故相は大きな交流電流が流れるため、電流零ミス現象は生じづらい）。健全相のうち電流零ミス期間の長い相について表示している。直流分が重畳した電流波形となり、電流が零点を交差しない期間が0.34秒程度生じている。この電流零ミス期間と地絡保護リレーの動作時間から、遮断器が定格遮断時間内に電流を遮断可能か判断できる。例えば、リレーの動作時間を0.2秒だとすると、遮断器接点が動作し始めてから0.14秒程度（=50 Hzで7サイクル相当）も電流零ミス期間が生じることが解析結果からわかる。一方、解析対象となる系統においては、定格遮断時間は一般的に3もしくは5

サイクルである。したがって、定格遮断時間内に電流は零点を交差せず、事故電流の遮断に失敗する。この対策として、中性点補償リアクトルと直列に抵抗を接続した解析結果が図6(b)である。同図より、直流分が速やかに減衰し、電流零ミス現象が生じないことがわかる。

また、図6(a)は複雑な波形となっているが、これは変圧器励磁特性の非線形性によるものである。非線形性を考慮しないと、電流波形が変化し、電流零ミス期間も変化することになる。このような非線形性を考慮し、各種現象を詳細に把握できることも、系統解析技術を利用するメリットといえる。このように、再生可能エネルギー導入前の事前検討を適切に行うためには、検討したい項目に対して必要な非線形性を考慮し、正しいモデル化を行うことが重要である。

以上のように、系統解析技術を活用することで、事前に適切な対策を検討することができ、信頼性の高い電力供給の維持が可能となる。

## 4 おわりに

先に述べたように、今後は再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、電力系統をとりまく環境が変化していくと考えられる。本稿で紹介した長距離ケーブル連系時の残留電荷放電現象および電流零ミス現象の解析は、その変化にあわせて重要性が高まる解析技術のひとつと思われる。今後も電力供給に関する信頼性の維持・向上に貢献できるよう、電力系統の変化に応じて必要となる系統解析技術の構築と有効活用に取り組んでいきたい。

### 参考文献

- (1) 経済産業省：「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」,(2020)

### 語句説明

注1) ATP: Alternative Transients Programの略称で、電気・電子回路の汎用解析ソフト。

注2) 高調波環境目標レベル: 電力利用基盤懇談会において提示された高調波抑制の目標値。配電系統で5%以下、特高系統で3%以下を目標としている。

### 森 佑介

技術開発本部  
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属

### 滝澤 明広

技術開発本部  
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属