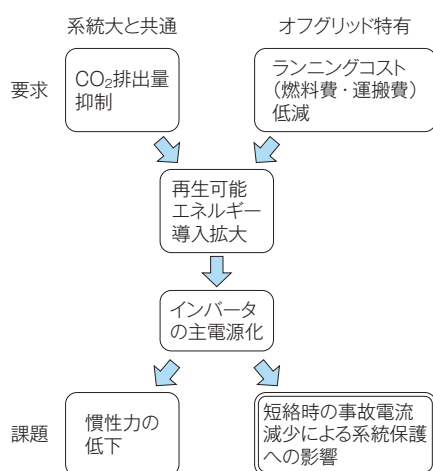


インバータを主電源としたオフグリッド向け系統保護リレーの開発

吉山和宏 Kazuhiro Yoshiyama
 森健二郎 Kenjiro Mori
 植田喜延 Yoshinobu Ueda
 露木和生 Kazuo Tsuyuki
 田島健二 Kenji Tajima
 加賀敬行 Takayuki Kaga

キーワード オフグリッド、再生可能エネルギー、インバータ、短絡保護

概要



オフグリッドにおける再生可能エネルギー導入課題

オフグリッドにおける電力供給は、主にディーゼル発電機で行われているが、燃料費などの運用コストの低減やCO₂排出量の抑制の観点から、再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大が期待されている。

一方で、再エネ電源の大半はインバータで、これらが主電源となった場合には短絡事故時の事故電流減少が課題となる。このため、東京電力ホールディングス(株)と(株)明電舎は、インバータ電源が主電源となるオフグリッド電力供給システムにおける短絡保護対策を適用した、従来のオフグリッド配電線保護との交換も考慮した新たな保護リレーユニットを開発した。リアルタイムシミュレータを用いて試作ユニットを様々な系統条件下で評価し、良好な結果が得られた。

1 まえがき

現在、オフグリッドにおける電力供給は、主にディーゼル発電機で行われているが、燃料費や燃料運搬費でコストを要している。一方で、オフグリッドでは再生可能エネルギー（再エネ）導入拡大の取り組みが進められている。太陽光発電（PV）や蓄電システム（BESS）などの再エネをオフグリッドに適用することで、ディーゼル発電機用の燃料費などのコスト削減、またCO₂排出量の抑制も期待できる。

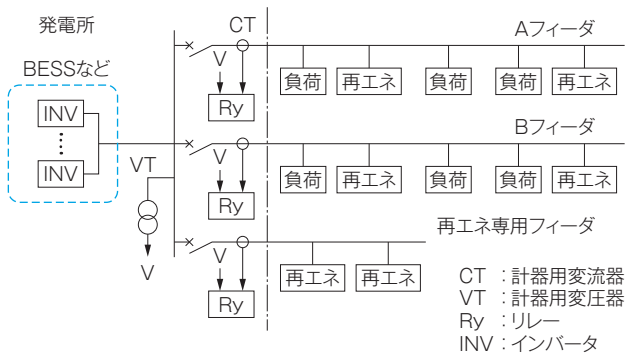
これまで、PVやBESSなどのインバータ電源の導入比率が高まることによる系統の慣性力低下が、周波数変動へ影響を及ぼすことは広く検討されてきている⁽¹⁾が、短絡事故時の短絡電流の減少による系統保護への影響及び対策を具体的に検討した事例は

公知化されてこなかった。そこで、東京電力ホールディングス(株)と(株)明電舎は、オフグリッド電力供給システムで、PVやBESSなどのインバータが主電源化した場合の系統保護への影響評価と対策の検討を進めてきた⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。本稿では、これまでに検討してきた対策を取り込んだリレーユニットを開発し、試作・評価した結果を紹介する。

2 開発リレー仕様

2.1 リレーシーケンス

インバータが主電源（電圧源）であるオフグリッドで二線短絡事故が発生すると、インバータは供給できる電流を超過しないよう出力電圧を調整することから、事故相の線間電圧が低下し、ディーゼル



第 1 図 オフグリッド系統構成例

想定されるオフグリッド系統の構成例を示す。

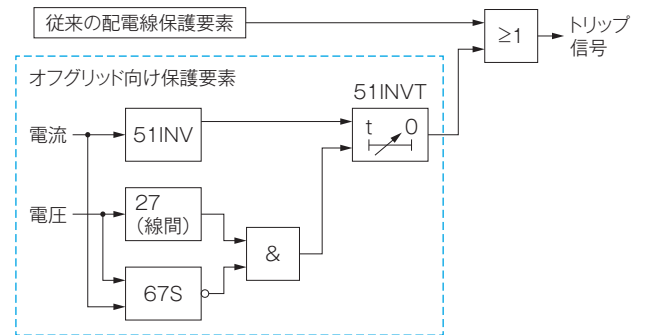
発電機が主電源の場合と比べて短絡電流が減少する⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。これらを基に、6kVや3kVの高圧配電線で電力供給を行うオフグリッドを想定し、短絡電流が減少しても短絡検出・事故回線選択を行うことができる手法を検討した⁽⁶⁾。その際に、再エネが大量に連系した健全回線の不要トリップやそのほかの健全回線の不要トリップを防止することも考慮し、従来の配電線保護要素に以下の要素を追加した。

- (1) 51INV 保護対象の配電線電流がインバータ電源の過負荷状態と想定される値を超過していることを検出
- (2) 27 (線間) 母線の線間電圧の低下を検出
- (3) 51INVT 健全回線の不要トリップを回避するために、保護対象の配電線電流の大きさによって動作時間を調整する反限時特性
- (4) 67S 再エネが大量に連系している健全回線の不要トリップを回避するために、保護対象配電線の潮流方向を検出

第 1 図にオフグリッドの系統構成例を、第 2 図に検討した要素を組み合わせた保護シーケンスを示す。

2.2 リレーユニット

現在オフグリッドの配電線保護に適用している当社製のリレーは、配電盤に実装可能なユニットタイプであるが、1990年代初頭に開発されたハードウェア (MRC シリーズ) で、既に生産中止で保守対応のみとなっている。そこで、現行のユニットタイプのハードウェアである MRR シリーズに、従来



第 2 図 オフグリッド保護シーケンス (概略)

オフグリッドの主電源がインバータとなった場合の短絡保護に必要な追加シーケンスを示す。従来の配電線保護要素と OR でトリップ信号を出力する。



第 3 図 開発リレーユニット

開発したリレーユニットの外観を示す。

の保護要素とオフグリッド向けの新規要素を組み合わせたリレーユニットを開発した。第 3 図に開発したリレーユニットの外観を、第 1 表に従来ユニットとの主な仕様の比較を示す。CPU (Central Processing Unit) 性能・プログラム書換性・アナログ性能・信頼性の面で、従来ユニットに対して上位互換のハードウェアとしている。なお、従来ユニット更新の対応も考慮し、配電盤への取り付け寸法に互換性を持たせている。

3 開発リレーの評価

3.1 リアルタイムシミュレーションモデル

開発リレー単体では、まず準拠規格などに基づいた単体試験を実施し、設計どおりに製作できている

第 1 表 リレー仕様比較 (抜粋)

開発機種は従来機種と比較して上位互換の仕様である。また、リレーユニットの交換を考慮した外形としている。

項目	従来機種 (MRCシリーズ)	開発機種 (MRRシリーズ)
準拠規格	電力用規格B402, JEC-2500	
CPU (ビット)	16	32
プログラム メモリ	EPROM (ソケット交換)	フラッシュメモリ
アナログサンプリング周波数 (系統周波数 50Hz) (Hz)	600	4800
A/D変換器分解能 (ビット)	12	16
リレートリップ方式	AIチャンネル及び出力部二重化	AIから出力部まで全て二重化
リレー要素 (主検出)	51, 51t (反限時), 51T (定限時), 51G, 67G, 67GT, 79	左記に加えて 51INV, 51INVT, 27, 67S
外形寸法 (mm)	W310×H265× D255	W310×H260× D240+a
質量 (kg)	約15	約8

ことを確認した。しかしながら、オフグリッドにおけるBESSや再エネの短絡事故時の応動を含めた評価は、一般的なリレー試験機で行うことは難しい。そのため、今回はリアルタイムシミュレータ (HYPERSIM) を用いて評価した。HYPERSIM内部に第 1 図で示したBESSや再エネを含めたオフグリッドシステムモデルを構築し、電圧・電流といったアナログ量や遮断器のオン・オフ状態といったデジタル情報をリアルタイムで出力する。

一方で、リレーはそれらの情報を入力としてリレー演算を行い、トリップ信号などを出力し、HYPERSIMはその信号を受け取り遮断器の状態を変化させる。また、システムモデルの時系列データを記録できる。

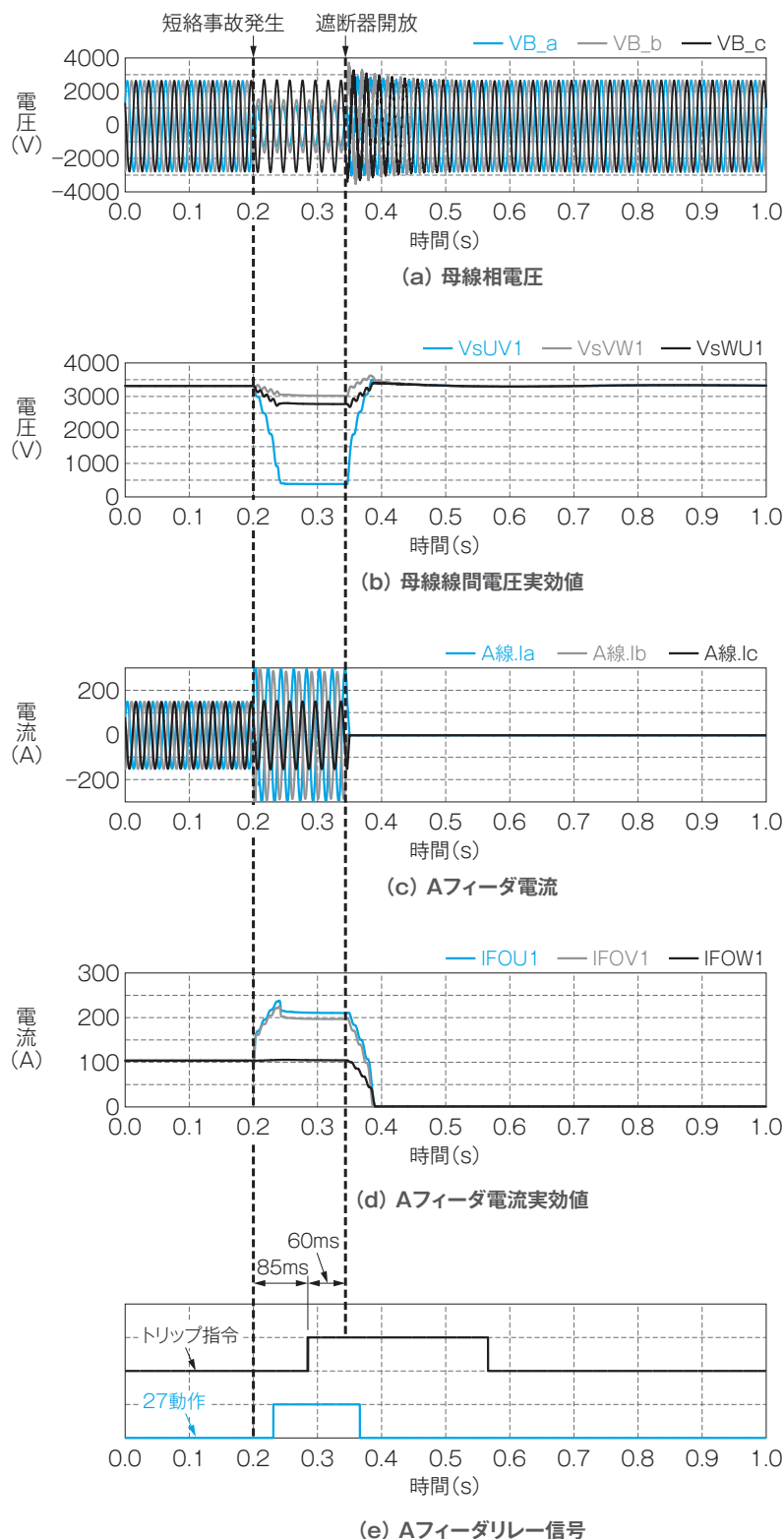
オフグリッドシステムとしては、第 1 図の構成をモデル化した。発電所母線にBESSが接続されている。本システムではこのBESSが主電源 (= 電圧源) となるが、過電流発生時には電圧を調整して運転継続可能なレベルまで電流を抑制する機能を付加している⁽⁷⁾。通常の配電線としてA・Bの2フィーダを設けた。これらの配電線巨長及び線種と、接続される負

荷及び再エネの容量は可変である。負荷は各配電線の送り出し直近・中間・末端に均等容量で分散配置し、再エネは送り出しと末端の2か所に配置した。また、別途再エネ専用 (出力可変) のフィーダも設けた。これらの再エネは、系統電圧低下時は事故時運転継続性を考慮して電圧低下直前の電流を供給するように運転する。事故点も各フィーダの中間や末端など様々な地点を選定して評価した。

3.2 評価結果

第 4 図にリアルタイムシミュレーション波形例を示す。シミュレーションにおける系統条件は、再エネの発電は再エネ専用フィーダのみで600kW、負荷はA・Bフィーダで合計600kW、配電線巨長は短巨長である。時刻0.2sでAフィーダの中間点で二線短絡事故が発生した場合の (a) 発電所3.3kV母線相電圧、(b) 母線線間電圧実効値、(c) Aフィーダ電流、(d) Aフィーダ電流実効値、(e) Aフィーダリレー信号 (27動作及びトリップ信号) を示す。短絡事故発生後、事故相間の線間電圧は定格電圧3.3kVに対して約380Vに低下する (第 4 図 (b))。また、Aフィーダ事故相の電流は約100Aから最大238Aに増加し、210A程度で安定する (第 4 図 (d))。51INVは事故前から動作しており、67Sも不動作であることから、事故発生後27が動作してから51INVTの動作時限を経過後にトリップ指令が出力される (第 4 図 (e))。このケースでは事故発生後85msでリレーからトリップ指令が出力され、Aフィーダの遮断器は動作時間を考慮した3サイクル (60ms) 後に開放する。その後、発電所母線電圧は定格レベルに復帰したことから、事故が除去されたことが確認できた。また、Aフィーダ以外のリレーが動作しないことも確認した。なお、51INVTの動作時限は、51INVの動作整定値や51INVTの時限倍率 (N) によって調整することができるため、例えば高圧需要家構内における短絡保護との時限協調を取ることもできる。

またこの例のほかに、様々なパラメータの組み合わせで評価を実施した結果、事故フィーダの遮断器のみが開放して事故除去されることが確認できた。



第 4 図 リアルタイムシミュレーション波形例

短絡事故発生に対してリレーが線間電圧の低下を検出して遮断器をトリップさせ事故を除去するまでの波形を示す。事故発生後85msでリレーが動作し、145msで遮断器が開放する。

したがって、今回開発したリレーによって、一般的にオフグリッドとして想定される配電システムで、短絡事故の検出・保護ができることが確認できた。な

お、高圧配電システムは非接地で、かつインバータは絶縁変圧器を介してシステムと接続することから、地絡事故は従来の配電線保護を適用できると考えている。

4 むすび

オフグリッドに再エネの導入拡大を実現する上で課題となる、インバータを主電源とした際の事故電流の減少に対応した短絡保護について、これまでに検討してきた手法を実現する保護リレーユニットを開発した。開発したリレーは、従来のオフグリッド用配電線保護との上位互換で、既設ユニットの交換も考慮している。試作したリレーユニットは、リアルタイムシミュレータに再エネなどを含むオフグリッドシステムモデルを構築して動作を評価した。結果として、一般的にオフグリッドとして想定される配電システムで、インバータ主電源化によって短絡電流が減少しても、短絡検出と事故回線選択ができることを確認した。

今後、オフグリッドへの再エネ導入拡大に貢献するコンポーネントの一つとして、現場への適用に向け検討・調整を進めていく。

- ・HYPERSIMは、OPAL-RT Technologies, Inc.の商標である。
- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 草柳儀隆・保坂直貴・吉山和宏・森健二郎・本庄昇一・渡邊政幸・三谷康範：「系統慣性等の低下に対応するための基盤技術開発（その1～事業概要～）」、令和3年電気学会全国大会講演論文集、6-060, 2021
- (2) 吉山和宏・廣瀬健太郎・森健二郎：「島嶼オフグリッドにてインバータ発電設備を主電源とする際の系統保護技術の基礎検討」、平成31年電気学会全国大会講演論文集、4-189, 2019
- (3) 植田喜延・吉山和宏・森健二郎：「島嶼オフグリッドにてインバータ発電設備を主電源とする際の系統保護技術の基礎検討」、電気学会保護リレーシステム研究会資料、PPR-19-025, 2019

- (4) 吉山和宏・菅野伯浩・森健二郎・植田喜延：「島嶼におけるインバータ設備が主電源となる場合の系統保護の検討」、令和2年電気学会全国大会講演論文集、6-275, 2020
- (5) 吉山和宏・森健二郎・植田喜延：「オフグリッドにてインバータ発電設備を主電源とする際の系統保護技術の検討」、電気学会保護リレーシステム研究会資料、PPR-20-002, 2020
- (6) 吉山和宏・森健二郎・植田喜延・加賀敬行・田島健二：「オフグリッドにて主電源がインバータ発電設備での系統保護技術の検討」、令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集、2021、**〈8月予定〉**
- (7) 井上稔也・鈴木茂之・東海林和・野田秀樹・鮫島良太・高見潤・鈴木健一：「電圧制御型仮想同期発電機の電流抑制手法」、令和元年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集、109, 2019

《執筆者紹介》



吉山和宏
Kazuhiro Yoshiyama
東京電力ホールディングス(株)



森健二郎
Kenjiro Mori
東京電力ホールディングス(株)



植田喜延
Yoshinobu Ueda
電力・エネルギー事業部技術部
電力系統向け変電・保護・制御機器のエンジニアリング業務に従事



露木和生
Kazuo Tsuyuki
製品技術研究所
デジタル保護継電装置の開発・設計に従事



田島健二
Kenji Tajima
コンピュータシステムユニット
デジタル保護継電装置の試験業務に従事



加賀敬行
Takayuki Kaga
コンピュータシステムユニット
デジタル保護継電装置の開発・設計に従事