

平成21年 4月30日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760196  
 研究課題名（和文） マイクログリッドと限流技術の融合による高品質電力供給技術の開発  
 研究課題名（英文） Development of High Quality Power Supply Technology by Integration of Fault Current Limiter into Microgrid  
 研究代表者  
 飯岡 大輔 (DAISUKE IIOKA)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：30377808

研究成果の概要： 同期発電機を有するマイクログリッドと商用系統の連系点に限流器を導入することを提案し、系統故障時におけるマイクログリッド内の瞬時電圧低下を限流器により補償できることを明らかにした。また、系統故障発生時に商用系統からマイクログリッドを解列し、同期発電機が自立運転を継続できる解列時刻の限界値（連系継続可能時間）を明らかにした。以上の結果から、同期発電機を有するマイクログリッドに限流器を導入することの有用性を示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	0	2,400,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,000,000	180,000	3,180,000

研究分野： 電力工学

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： マイクログリッド，同期発電機，限流器，自立運転，連系継続可能時間，短絡故障，瞬時電圧低下

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球環境に優しいマイクログリッドによる高品質電力供給の実現と課題： 近年、地球環境問題への意識の高まりを受けて、多種多様な分散型電源により構成されるマイクログリッドという電力供給方式が注目されている。マイクログリッドが連系する電力系統において故障が発生した場合においても、故障波及を受けずに、高品質を維持した電力供給を継続することが望まれる。系統故

障時のマイクログリッドの制御として、以下の動作が考えられる。

- ① マイクログリッドを故障系統から高速に切り離す。
- ② UPS、二次電池を利用して、故障発生に伴って低下した電圧を補償する。
- ③ 同期発電機を連系した場合、故障時に過電流が流出するので、発電機保護の観点から、過電流継電器によりこれを検出し、発電機をマイクログリッドから切り離す。
- ④ 機器保護の観点から、インバータの過電流

保護装置により燃料電池などの電源が停止する。

しかしながら、以下の課題が考えられる。

⑤UPS や二次電池が電圧補償できる時間は設備容量に依存する。故障時間が長引く場合、UPS や二次電池の設備容量が大きくなり、設備コストが増大する。

⑥同期発電機、燃料電池をマイクログリッドから切り離すと、再連系まで時間を要する。故障時間が長引く場合、マイクログリッド内で電力供給が可能な発電設備がUPS や二次電池のみとなることも考えられる。故障時に十分な高品質電力を供給できない可能性がある。

(2) 電力品質劣化時の負荷挙動： 電子機器、パワーエレクトロニクス機器の普及に伴い、負荷に供給される電力の品質向上が求められている。瞬時電圧低下時の負荷の挙動は、電圧低下時に消費する電力により決まる。そのため、瞬時電圧低下時の負荷挙動を詳細に把握するためには、負荷の電圧特性を考慮する必要がある。

(3) 限流器の導入による短絡電流抑制と電力品質の向上： 限流器とは故障時の過電流を抑制する電力機器である。限流器は、通常時は低インピーダンス（ほぼゼロ）であるが、故障時に高インピーダンスを発生し、過電流を抑制する。限流器をマイクログリッドの連系線に導入すれば、分散型電源からの故障時過電流を抑制することができる。また、故障時におけるマイクログリッド内の電圧維持することも期待できる。さらに、故障時に発電機が運転継続可能となるため、マイクログリッド内に大容量の高品質電力を供給できる可能性がある。すなわち、(1)に示した⑥の課題を克服することができる。しかしながら、マイクログリッドに限流器を導入した場合に期待される効果を体系的に示した例がない。

## 2. 研究の目的

分散型電源を有するマイクログリッドの連系線に限流器を導入することにより、系統故障時においてもマイクログリッド内では常に高品質の電力供給を実現できる技術を開発することを目的とする。本研究では、下記項目を明らかにし、マイクログリッドと限流技術の融合により、現状よりも高品質の電力を大容量で供給できる技術を確立する。

(1) 分散型電源が多量に連系されると、短絡電流が連系系統に及ぼす影響が大きくなるため、現状では、分散型電源の連系量が制限されているのが課題である。系統故障時にマ

イクログリッド内の分散型電源から流出する過電流を限流器により抑制し、連系系統に悪影響を及ぼさないシステムを開発する。

(2) 高品質の電力を供給する必要がある機器の負荷特性はさまざまであり、瞬時電圧低下の負荷挙動もさまざまである。それらの負荷ごとに対策をとると設備コストが膨大になることが懸念される。瞬時電圧低下に対して、負荷特性の異なる負荷が混在するシステム内の電圧補償を限流技術により補償する試みは実施例がない。マイクログリッド内の負荷特性に依存せず、電力品質は常に最上級であることを保証するシステムを、限流技術を応用して開発することを目的とする。

(3) 現状では発電機保護の観点から、過電流出力時には発電機を停止する。一旦発電機を停止すると、再連系まで時間を要するため、故障時間が長引いた場合、マイクログリッド内の電力を十分確保できなくなる可能性がある。系統故障時においても同期発電機の運転を継続できるシステムを、世界的にも検討例がない「限流技術と発電機制御システムとの協調」により実現することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 検討モデル： 図1に配電系統モデルを示す。6.6kV 配電用変電所に接続されている配電線に、同期発電機を有するマイクログリッドモデルが限流器を介して連系することを想定した。同期発電機は AVR および APFR により制御されているものとした。

限流器として、故障発生後に純抵抗を発生する抵抗型限流器と純インダクタンスを発生するリアクトル型限流器の二種類を想定

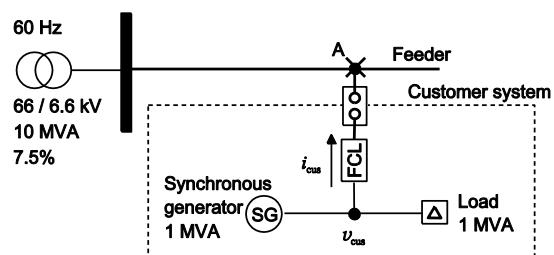


図1 検討モデル

①計算機シミュレーションモデル： 電力系統の電磁過渡現象シミュレーションソフトウェア PSCAD/EMTDC を用いて、図1のモデルを構築した。系統故障の発生により、限流器を流れる電流の絶対値が500Aを超えると、図2に示すように、限流器は抵抗あるいはインダクタンスを発生するものとした。

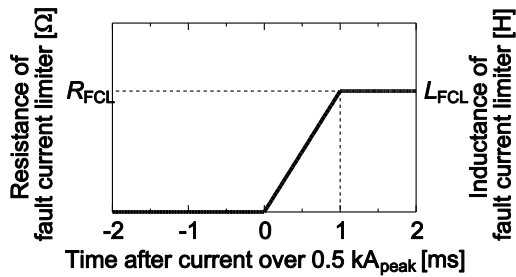


図2 限流器の発生インピーダンス

②実証試験用マイクログリッドモデル： 図1の検討モデルのスケールを縮小した実証試験モデルを製作した。図3は装置正面からの全体写真である。図1における配電用変電所を、200V、6kVAのプログラマブル交流電源で模擬した。同期発電機として、200V、2kWのものを使用し、原動機にはインバータ制御の誘導電動機を使用した。限流器として、図4の回路図で表される装置を製作した。抵抗とIGBTを並列接続した転流方式の限流器である。通常時において、IGBTはオン状態であり、電流はIGBTを流れる。しかし、過電流を検出すると、IGBTを瞬時にオフ状態とし、電流は抵抗側に転流し、限流される。



図3 実証試験用マイクログリッドモデル

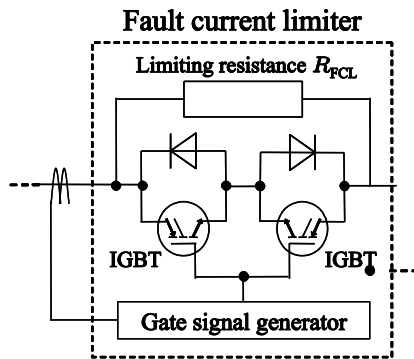


図4 IGBTを用いた転流型限流器モデル

## (2) 瞬低時の限流器導入効果

配電系統の上位系統において故障が発生することを想定し、配電用変電所の送り出し電圧が低下する場合を想定した。配電用変電所の送出電圧が低下すると、連系しているマイクログリッド内の電圧も低下する。この電圧低下を、マイクログリッドの連系線に導入する限流器で補償する。電圧低下時の残存電圧と電圧低下の継続時間をパラメータとすることで、(1)の①および②に示したモデルを用いて、限流器の導入効果を明らかにした。

(3) 連系配電線短絡故障時におけるマイクログリッドの連系継続可能時間： マイクログリッドの連系点(図1のA点)において三相短絡故障が発生することを想定した。この場合、マイクログリッドは連系系統から解列される。解列後、発電機はマイクログリッド内において自立運転することになる。自立運転を継続するためには、発電機出力と負荷消費電力のバランスを十分にとる必要があるが、限流器を導入すると、発電機の出力に過渡的な変化が生じるため、自立運転移行時の発電機の動作を明らかにする必要がある。そこで、自立運転を継続できる最大の解列時刻を連系継続可能時間と定義し、限流器が及ぼす影響を定量的に明らかにした。

## 4. 研究成果

### (1) 瞬低時の限流器導入効果

#### ① 計算機シミュレーションによる検討：

図5(a)および(b)は、残存電圧50%、瞬低の継続時間を200msとした場合のマイクログリッド内電圧および連系線電流の波形であり、限流器を導入しない場合である。電圧が低下すると、発電機から過電流が発生している。

図6(a)および(b)は、23Ωの抵抗を発生する抵抗型限流器を導入した場合のマイクログリッド内電圧および連系線電流である。同図では、瞬低終了後も限流器は抵抗を発生したままとしている。過電流を検出して限流器が抵抗を発生するため、連系線の過電流が抑制されている。また、瞬低期間中の電圧低下が83%まで回復している。しかし、瞬低終了後も限流器が電力を消費するため、発電機が過負荷となり、発電機は運転を継続できないことがわかった。

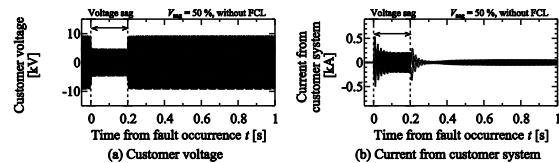


図5 瞬低時の波形(限流器なし)

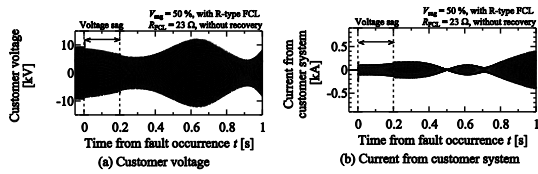


図 6 瞬低時の波形 (限流器あり, 復帰なし)

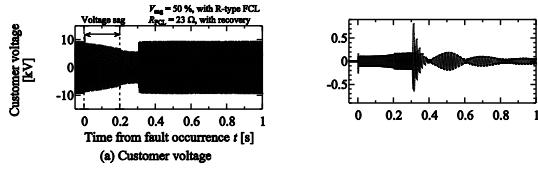


図 7 瞬低時の波形 (限流器あり, 復帰あり)

図 6 のような電圧, 電流のビートを防ぐために, 瞬低が終了してから 100ms 後に抵抗型限流器の端子間をスイッチで短絡し, 限流抵抗を系統から切り離れた。図 7 はそのときの需要家内電圧および連系線電流である。限流抵抗の切り離しにより, 発電機の脱調を防ぐことができた。一方で, スイッチで限流器を短絡した際に, 過電流が発生することもわかった。

図 8 には, 瞬低期間中の電圧実効値と残存電圧との関係を示している。同図から, 抵抗型限流器とリアクトル型限流器の効果を比べると, 残存電圧が 50~75% の瞬時電圧低下が発生したとしても, 両者ともに, 需要家内電圧を 80% 以上に補償できることがわかった。詳細に見ると, 残存電圧が 50~70% の範囲では, 抵抗型限流器の場合の補償効果が若干高いことも明らかとなった。

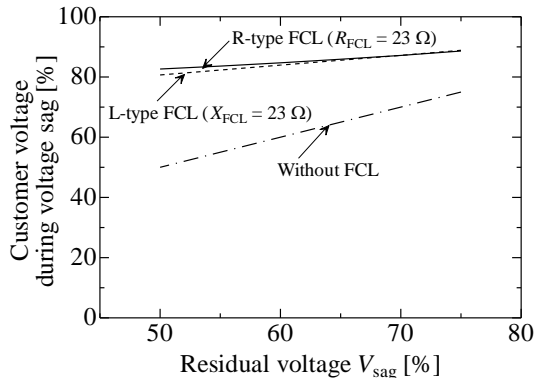


図 8 瞬低期間中のマイクログリッド内電圧と残存電圧との関係

図 9 は, 瞬低後 100ms で限流器の端子間をスイッチで短絡した瞬間に生じる過電流の大きさと残存電圧との関係を示している。残存電圧が 50~75% の範囲において, 抵抗型限流器を切り離れた瞬間に生じる過電流は, 瞬低直後の過電流よりも大きい。また,

抵抗型限流器を用いた場合の過電流は, リアクトル型限流器の場合の約 3 倍の大きさとなることがわかった。

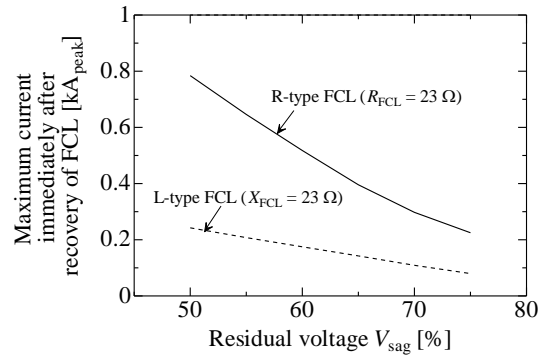


図 9 スイッチ短絡時の過電流と残存電圧との関係

以上の結果から, 抵抗型限流器とリアクトル型限流器の瞬低補償効果はほぼ同等であると言えるが, 抵抗型限流器の場合, 瞬低後の制御に注意する必要があることがわかった。

## ② 実証試験用マイクログリッドモデルによる検討:

3. (1)②に示した装置を用いて実証試験を行った。

図 10(a) および (b) は, 15Ω の限流抵抗を発生する限流器を導入した場合のマイクログリッド内電圧および連系線電流の波形である。残存電圧が 65%, 継続時間が 200ms である瞬時電圧低下を発生させた。また, 瞬低終了から 30ms 後に IGBT を再びオンすることで, 限流器を復帰させた。限流器を導入することにより, 瞬低中のマイクログリッド内電圧は 65% よりも高くなっている。瞬低終了直前の負荷端電圧は定常時の 77% であった。連系線電流については, 瞬低発生直後の電流最大値が 4.2A まで抑制されている。また, 瞬低終了直後の過電流も 3.7A まで抑制できているが, 限流器復帰に伴って 13.2A という新たな過電流が発生している。この過電流については, 限流器の復帰方法を工夫することにより抑制可能と考えるが, 具体的な方法については今後の課題である。

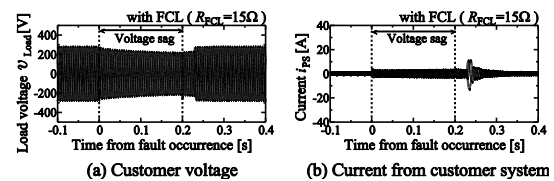


図 10 実証試験波形例

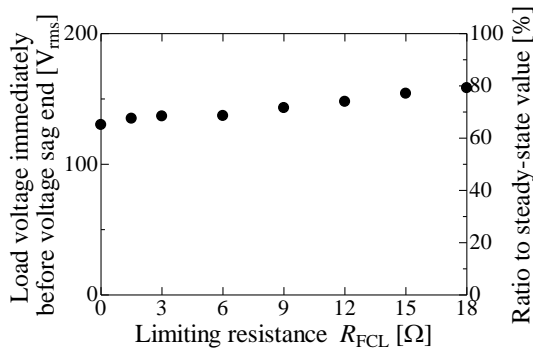


図 11 実験結果 (マイクログリッド内電圧と限流抵抗との関係)

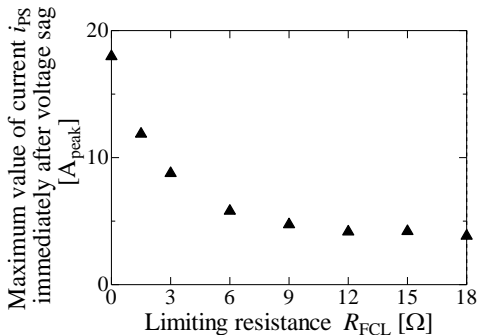


図 12 実験結果 (瞬低後の過電流と限流抵抗との関係)

図 11 は限流抵抗と瞬低終了直前のマイクログリッド内電圧実効値との関係を示す。限流抵抗が大きいほど、マイクログリッド内電圧を高くすることができる。

図 12 は、瞬低発生直後の過電流最大値をそれぞれ示している。限流抵抗が大きくなるほど、瞬低発生直後の過電流最大値は小さくなる。

(2) 連系配電線短絡故障時におけるマイクログリッドの連系継続可能時間：

三相短絡故障発生後、マイクログリッドを解列するが、マイクログリッド内電圧の周波数を見て、自立運転移行後に発電機が正常に運転を継続するか否かを判断した。図 13 には、マイクログリッド内電圧の周波数の時間変化を示す。同図は限流器を導入しない場合である。解列時刻を 0.37s とした場合、解列後に周波数が低下し続けてしまい、発電機は自立運転を継続することができない。一方、解列時刻を 0.36s と 0.01s 早くした場合、自立運転へ移行後の周波数を 60Hz に維持できていることがわかる。このことから、限流器を導入しない場合の連系継続可能時間は 0.36s であると判断した。

図 14 は、限流抵抗が 10Ω である抵抗型限流器を導入した場合の周波数の時間変化

である。限流器を導入しない場合の連系継続可能時間である 0.36s で解列すると、周波数を維持できないことがわかった。限流抵抗が 10Ω である場合の連系継続可能時間は 0.30s であり、限流器を導入しない場合よりも短くなることがわかった。

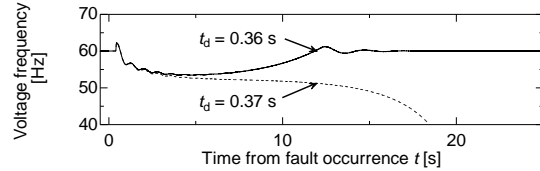


図 13 周波数 (限流器なし)

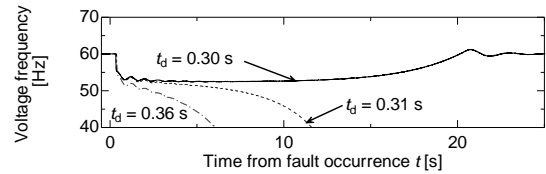


図 14 周波数 (限流器あり)

図 15 には、限流抵抗あるいは限流リアクタンスと連系継続可能時間との関係を示している。同図から、抵抗型限流器を導入した場合、限流抵抗が 5Ω から 24Ω の範囲における連系継続可能時間は、限流器なしの場合より短くなっている。また、限流抵抗が 24Ω 以上であったとしても、連系継続可能時間は 0.4s ~ 0.5s 程度の範囲であった。これに対して、リアクトル型限流器を導入した場合の連系継続可能時間は、限流器なしの場合よりも大きくなる。特に、限流リアクタンスが 16Ω 以上となると、限流リアクタンスの増加に対する連系継続可能時間の増加が著しくなる。限流リアクタンスが 19Ω 以上の場合、連系継続可能時間は 5.00s 以上であることが判明した。

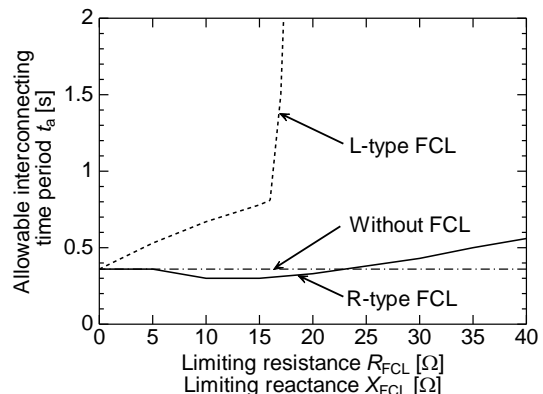


図 15 連系継続可能時間と限流インピーダンスとの関係

マイクログリッド内の発電機容量と負荷容量の組み合わせを変えて、連系継続可能時

間を算出したところ、以下の事項が明らかとなった。

①限流抵抗あるいは限流リアクタンスと連系継続可能時間との定性的な関係は、発電機容量が負荷容量以上である場合と負荷容量よりも小さい場合とで異なる。

②発電機容量が負荷容量以上である場合、抵抗型限流器を利用すると、限流器を導入しない場合よりも連系継続可能時間が短くなる限流抵抗の範囲がある。

③発電機容量が負荷容量以上である場合、リアクトル型限流器を利用すると、限流器を導入しない場合よりも連系継続可能時間が長くなる。このことは、逆潮流の量が大きくなるほど顕著になる。

④発電機容量が負荷容量よりも小さい場合、すなわち負荷の一部が配電系統からの給電を受けている場合、限流器の導入によって連系継続可能時間はあまり変化しない。

#### 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1件)

① 飯岡大輔、西田忠光、横水康伸、松村年郎：同期発電機を有する需要家の配電系統故障時における連系継続可能時間に対する限流器導入効果、電気学会論文誌 B、査読有、128、2008、pp.929-936

[学会発表] (計9件)

① 飯岡大輔、日比教之、横水康伸、松村年郎：抵抗型限流器による同期発電機連系需要家の瞬低補償に関する実験的検討、電気学会全国大会、2009年3月17日、北海道大学

② 飯岡大輔、日比教之、横水康伸、松村年郎：配電系統故障時における自立運転開始後の同期発電機を有する需要家内電圧に及ぼす限流器の影響、電気関係学会東海支部連合大会、2008年9月19日、愛知県立大学

③ 飯岡大輔、横水康伸、松村年郎：同期発電機を有する需要家の瞬低補償を目的とした限流器の適用、電気設備学会全国大会、2008年9月4日、愛媛大学

④ 飯岡大輔、日比教之、横水康伸、松村年郎：配電系統故障時における需要家内電圧維持と連携継続可能時間－限流器導入効果－、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2008年8月8日、熊本大学

⑤ D.Iioka、Y.Yokomizu、T.Matsumura：Influence of Fault Current Limiter on Isolated Operation of Customer System with Synchronous Generator、IEEE Power & Energy System Society 2008 General Meeting、July 23、2008、Pittsburgh、Pennsylvania、USA

⑥ 飯岡大輔、横水康伸、松村年郎：同期発

電機を有する需要家の瞬低補償を目的とした抵抗型限流器の適用、電気学会全国大会、2008年3月20日、福岡工業大学

⑦ D.Iioka、Y.Yokomizu、T.Matsumura：Influence of Fault Current Limiter on Allowable Interconnecting Time Period of Customer System with Distributed Generator during Fault Condition in Power Utility System、International Symposium on EcoTopia Science 2007、ISETS07、November 25、2007、Nagoya University、Japan

⑧ 飯岡大輔、横水康伸、松村年郎：逆潮流の有無が分散型電源の連系継続可能時間に及ぼす影響、電気関係学会東海支部連合大会、2007年9月27日、信州大学

⑨ 飯岡大輔、横水康伸、松村年郎：配電系統故障時における分散型電源連系継続可能時間に対する限流器導入効果、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、2007年9月27日、愛知工業大学

[その他]

① 飯岡大輔、電気設備学会全国大会発表奨励賞受賞、2008年11月21日

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯岡 大輔 (IIOKA DAISUKE)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30377808