分散型電源を有する受配電システムと電流遮断技術の展開

正 員 横水 康伸*

New Development of Power Distribution System Resulting from Dispersed Generations and Current Interruption

Yasunobu Yokomizu*, Member

Dispersed generation systems, such as micro gas-turbines and fuel cells, have been installed on some of commercial facilities. Smaller dispersed generators like solar photovoltaics have been also located on the several of individual homes. The trends in the introduction of the these generation systems seem to continue in the future and to cause the power system to have the enormous number of the dispersed generation systems. The present report discusses the near-future power distribution systems.

キーワード：分散型電源，直流分散システム，直流電流遮断，

Keywords: dispersed generator, dc distributed system, dc current interruption

1. まえがき

燃料電池およびマイクロガスタービンなどの高効率化・高性能化に伴って，ビルやホテルなどに分散型電源の導入が進んでいる。また，太陽光発電および風力発電で代表される新エネルギー発電の技術開発が推進されるとともに，地球温暖化をはじめとする地球環境問題への対応およびその関心の高まりから，個人住宅においても，新エネルギー発電システムが導入されつつある。それらの電源によって発電された電気エネルギーは，もちろん，各種機器によって消費される。本解説では，分散型電源の導入進展，また同電源の発電形態と消費機器の動作電圧とに着眼した研究例を概観している。さらに，その電力システムにおける開閉保護として電流遮断を基礎的視点から議論している。

2. 分散型電源を有する電力システム

2・1 分散型電源の導入進展 分散型電源は，以前は，主に山奥の無線中継所および灯台など，人が容易に行けな場所における電源として設置されてきた。しかし，近年，地球温暖化現象の抑制およびエネルギー自給率の向上などを背景として，また，各種の分散型電源の技術開発の進展もあって，分散型電源の導入が普及している。たとえば，電気エネルギーを大量に消費するオフィスのいくつかに

においては，消費数十～数千 kW のコージェネ型ガスエンジンやコージェネ型燃料電池などが導入されている。その導入効果として 1 次エネルギーおよび CO₂ 排出量の低減が示されている⁽¹⁾。また，ウインドファームにおいては，数百～数千 kW の風力発電機の設置が進み，その設置台数が年々増加している。

分散型電源の導入は，このようなオフィスビルおよびウインドファームのみならず，個人住宅にまで進んでいる。ただし，住宅において最も利用しやすい自然エネルギーは太陽エネルギーであるため，住宅では主として太陽光発電システムが設置されている。さらに，ある 1 戸建て住宅では，住宅の熱損失係数を世界最高レベルにまで低減させることによって，大量の電気エネルギー消費機器である空調機器の消費電力を低減させ，その結果，1 戸建て住宅において，太陽光発電システムの年間発電エネルギーが消費エネルギーよりも上回ることを達成している⁽²⁾。また，ある一地域では，隣接する 42 軒の 1 戸建て住宅のすべてが太陽光発電システム（総容量で 173 kW）を具備しており，太陽光発電システムが高密度で設置されている地域も出現している⁽³⁾。

現在のところ，住宅における分散型電源の主役は太陽光発電システムである。しかし，風力発電との併用であるハイブリッド型システムも出現している。また，最近の固体高分子形燃料電池の技術発展により，家庭用や小規模業務用の固体高分子形燃料電池コージェネレーションシステムの実用化に向けた取り組みが実施されている⁽⁴⁾。自然エネルギー利用の発電システムでは天候の変動によって発電量が大きく変化してしまうが，この燃料電池システムでは，そのような変動は皆無であることにも特徴がある。

* 名古屋大学 大学院工学研究科 電子情報システム専攻

〒464-0814 名古屋市千種区不老町

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-0814

図 1 小規模モデルにおける状態更新の推移⁽⁶⁾

Fig. 1. A state transition of customers for a small-scale model⁽⁶⁾.

2.2 超分散型エネルギーシステムと自律分散制御

上述のように、多種の超分散型電源の開発が進み、また多くの方々も新エネルギーに関心を深めていることを鑑みると、将来には需要家単位の分散型電源の設置数および総発電容量が急速に増加する可能性もある⁽⁵⁾。ついには、分散型電源の導入容量および導入台数とともに電力システム内で支配的な立場を占めるような状況に進展する可能性もある。文献(6)では、そのような状況に着目し、それを超分散環境と呼び、さらに燃料電池やマイクロガスタービンなどの分散電源が電力のみならず熱エネルギーをも供給可能なことも踏まえ、超分散環境における電力システムを超分散型エネルギーシステムと名付けている。このエネルギーシステムでは、分散型電源間に生じる電気エネルギーの複雑なやりとりがシステムの構造や振る舞いを決定することになり、将来にわたるエネルギー問題に新たな視点を与え、これまでとは全く異なる超分散環境に合致した新しいエネルギーシステム工学につながる可能性を秘めている。

前述の文献(6)では、負荷にも発電機にもなりうる需要家を、統計力学におけるイジングモデルに基づいてモデル化した上で、超分散環境においては、上位レベルからの集中制御ではなく、需要家の近傍情報に基づくごく簡単な論理による自律分散制御により、需給平衡を維持できることが指摘されている。図1は、10×10の100需要家における状態更新の推移を示したものである。初期状態ではすべての需要家がの負荷状態であり、需給が均衡していない。しかし、状態更新の繰り返しの伴って、の発電状態との負荷状態とで均衡が保たれ、その結果、大域的にも局所的にも需給平衡が保たれ、エネルギーシステムが自律分散的に需給平衡に移行・維持できることが示されている。

2.3 分散型電源を含んだ直流受配電システム

エネルギーシステムは、発電、貯蔵および消費機器によって構成されることとなる。そこで、機器に視点を移すこととすると、以下のことが言える。

分散型電源の多くは、太陽電池および燃料電池などで代表されるように、直流で発電している。また、自然エネルギー利用型分散電源の発電パワー・時間と負荷の電力需要との不平衡に備え、電気エネルギー貯蔵機器を設置することが進むことも予想される。貯蔵機器である二次電池、 μ -SMES および電気二重層キャパシタにおいても、直流の形態で充電・放電する。一方、ほとんどの消費機器、すなわち家電・オフィス・情報機器においては、現状では、商用周波数の

図 2 直流受配電システムの概念図⁽⁷⁾

Fig. 2. Concept of DC power network in building or neighborhood area⁽⁷⁾.

交流を入力するとはいうものの、その内部あるいは AC アダプターにおいて直流に変換している。したがって、家庭やビルなどにおいて、分散型電源、蓄電機器および消費機器の状況を鑑みて、直流による受配電システムが提案されている^{(7)~(9)}。図2は、そのおおざっぱなイメージ図を示している。同図の場合、発電機器として太陽電池および燃料電池を備え、それらの発電電力は、直流にて負荷に供給される。図2に示すネットワークは、ある一つの需要家内で閉じていることも考えられるし、あるいは周辺の数軒の需要家で構成されることも考えられる。なお、発電機器の発電電力と消費機器の消費電力との兼ね合いから、発電電力が不足することも推定され、その場合には既存の電力システムと整流器を介して接続されることも考えられる。

文献(7)では、この直流システムにおける明らかな特徴として、インバータおよび整流回路が一切不要であること、これに伴う高効率化および長寿命化を期待できることを挙げている。また、これらの特徴に加えて、待機電力の削減、ひいては省エネルギーの達成および機器のコストダウンにもつながる。また、多くの分散型電源が新エネルギーを利用することから CO₂ をそれだけ排出しないことになり、我が国の温室効果ガス排出削減の新しいオプションにもなりうる。さらには、各地域において図2に示される直流システムが構築され、各地域の直流システムを連系する場合には周波数連系はもはや不要である。したがって、分散型電源の導入が進展した形態においては、発電機器から消費機器までの間において、加えて各地域間において、現用の商用周波数の交流に変換することなく、直流のままの方が多種多様のメリットをもたらすこととなる。

前述の文献(7)では、直流システムの柔軟性を確保するために、直流電圧を自由に変換できる DC/DC コンバータの導入が必要であると記述している。それにあたり、インバータとコンバータの電力変換効率を比較したものが、図3である。同図から、同程度の容量において DC/DC コンバータの電力変換効率が、DC/AC インバータおよび AC/DC インバータの効率よりも上回っていることがわかる。このことから、直流システムに DC/DC コンバータを用いても、現状のシステムよりも変換時における電力損失の低減が期待

図3 インバータおよびコンバータの効率⁽⁷⁾

Fig. 3. Energy conversion efficiency for each element as a function of capacity⁽⁷⁾.

できる。

文献(8)では、分散型電源が主体となる状況下に対して、電力クラスターという概念を提示した上で、新世代の電力システムのビジョンを述べている。電力クラスターの最小単位では、直流の形態による受配電が提案され、再生可能エネルギー由来の電力の利用の視点のみならず、省資源性、安全保障性および小電力大量生産にまで視点を広げ、メリットが述べられている。

ビル内の直流給電を評価研究した例もある。iDC（インターネットデータセンター）は、多数のサーバー、情報のストレージ装置およびルータなどが設置されている。iDCの消費電力は床面積あたり 1000 W/m^2 以上であり、通常のオフィスビルにおける消費電力約 50 W/m^2 に比べて、極めて高密度な消費量である⁽¹⁰⁾。iDCの機器における内部回路も直流で動作している。そこで、直流給電システムの導入が検討され、交流給電と比較されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。機器内電子回路に 1 kW を給電する場合、交流系では 2.14 kW を給電することが必要であるが、直流系では約 80% の 1.68 kW を供給すれば良く、このため床面積 1000 m^2 の iDC の場合、年間電気料金を $4,700$ 万円も低減できることが示されている。

一方、超伝導ケーブルにおいては、交流通電の大電流化には交流損失の低減の克服を伴うが、直流通電に対しては、超伝導線材の本数を増加させるだけで容易に大電流化を達成できる。したがって、直流給電システムでは、超伝導のもつ大電流通電能力を簡単に生かすことができる。文献(13)では、そこに着目した。iDCのビルにおいて直流超伝導ケーブルによって給電した場合について、初期投資コストおよび冷凍機運転コストを考慮した経済性評価から、超伝導ケーブルの導入の見通しを得ている。

直流受配電システムは、大学・企業などの研究機関だけでなく、電気学会 電力・エネルギー部門 電力技術委員会 直流配電網フィージビリティ調査専門委員会（委員長：東京電機大学 柳父悟 教授）でも調査されている。

2.4 課 題 分散型電源に関わる自律分散制御および直流による受配電システムの実現には、多くの課題と研究開発を残している。(1) 集中型電源と分散型電源群との協調のあり方、(2) 自律分散制御、(3) 2 を実現するモニターおよびインターフェイス技術、(4) 再生可能エネルギー

ギー発電技術、(5) 電力貯蔵技術、(6) パワエレ技術、(7) 超伝導機器、(8) 直流開閉・保護技術、(9) 交流から直流配電への移行期に関する技術課題調査、(10) 受配電の電圧の最適化および(11) 環境保全への効果の評価。

3. 直流遮断に対する H_2 の効果

3.1 アーク電圧と走行速度 直流受配電システムにおいては、DC/DC コンバータに故障電流の抑制機能を持たせることができるが、電源や蓄電器の出力端子の直近においては短絡保護機器を設置することとなる。また、家電製品は開閉器を通じて電源と入り切りされる。これら保護機器および開閉器として、SiC 半導体の進展に伴って、半導体遮断器およびスイッチも期待されるが、当面は機械式接点をもつ遮断器およびスイッチが続くと予想される⁽¹²⁾。そこでは、接点間にアークが形成され、消弧ガスが異なれば、高温ガスの特性ひいては電流遮断性能も変わる。

ガス種の相異によるアーク特性の違いを基礎的に研究した例がある⁽¹⁴⁾。図4は、 H_2 をはじめ、 CO_2 および air アークにおける電界の強さを示している。非定常状態での器壁安定化アークにおいて、アーク電圧を熱平衡の仮定のもとで理論計算によって求めたものである。同一の時間において、 H_2 中の電界の強さは CO_2 および air の場合よりも 2~10 倍も高い。すなわち、消弧ガスとして H_2 を用いると、その高温ガス物性により、高いアーク電圧を得ることができることを指摘している。

図5は、電磁力を受けたアークの走行速度の測定結果の例を示したものである⁽¹⁵⁾。この実験では、アークは、外部

図4 各種ガスアークにおける電界の強さ

Fig. 4. Electric field strength for H_2 , air and CO_2 arcs.

図5 電磁力駆動を受けた各種ガスアークの走行速さ⁽¹⁵⁾

Fig. 5. Velocity of arc driven by means of electromotive force⁽¹⁵⁾.

印加磁界によって棒状電極を中心としてリング電極上を回転走行する。同図において、 H_2 の測定値は約 250 A における 1 例のみであるが、 H_2 アークの走行速度は CO_2 および SF_6 よりも 2 倍以上に速い。 H_2 環境下では、主としてガス密度の低下によって抗力が減少し、アーク走行速度が速くなると考えられる。

3・2 直流用遮断器およびスイッチにおける限流遮断
前述の直流給受配電システムのみならず、現用の直流システムも視野に入れて以下のことが言える。配線用直流遮断器およびスイッチでは、限られた空間内で、接点間のアーク電圧を電源電圧にまで高め、直流電流を限流遮断することとなる。上述のように、 H_2 雰囲気気下では Air の場合よりも高いアーク電圧を容易に実現でき、限流遮断に効果的である。また、配線用遮断器では、アークをアークランナー上で高速移動させる方法が採用されることもあり、この遮断器ではアークランナー上のアーク走行速度は速いことが要求される。 H_2 雰囲気気はアークの走行速度の高速化を容易にすると考えられる。

4. ま と め

分散型電源の運用には、自律分散制御による周辺電源・負荷および既存の電力システムとの協調が必要になると考えられる。そこに、直流受配電システムを加えると、エネルギー消費量の抑制および分散型電源と消費機器との親和性の向上など電気エネルギー分野において新展開となる可能性を秘めている。

かつて超高压遮断器においては、消弧ガスを空気から SF_6 に替えたことが大きな要因となって、遮断容量を著しく増加でき、ついには 500 kV-63 kA の 1 点切り遮断器の実現にまで到達した。低圧の遮断器では、グリッドの配置やアークランナーの形状の調整も重要な影響因子であるが、超高压遮断器と類似して、ガス種を H_2 に替えることで低圧用遮断器の遮断性能を著しく向上できると考えられる。

(平成 16 年 5 月 24 日受付)

文 献

- (1) T. Kato, Y. Yokomizu, T. Okamoto, and Y. Suzuoki: "Assesment of PV's and CGS's ability for reducing CO_2 emission viewed from whole energy system", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.3, pp.342-349 (2001-3) (in Japanese)
加藤文佳・横水康伸・岡本達希・鈴置保雄:「エネルギーシステムにおける PV および CGS の CO_2 削減効果」, 電学論 B, **121**, 3, pp.342-349 (2001-3)
- (2) 井田浩文:「ゼロ・エネルギー住宅」, 電気評論, No.12, pp.22-27 (2001)
- (3) H. Iwatsuki: "Fact-finding on Interconnection of Photovoltaic Power Generation in the Distribution System—Effects of Increase in Photovoltaic Power Generation on Distribuion System—", Chubu Electric Power Co., Inc., Research Development News, No.96, pp.11-12 (2002) (in Japanese)
岩月秀樹:「太陽光発電連系の実態調査—太陽光発電の増加が配電系統に与える影響について—」, 中部電力(株)技術開発ニュース, No.96, pp.11-12 (2002)
- (4) 山口竜一:「家庭用燃料電池の技術動向」, OHM, No.7, pp.28-34 (2003)
- (5) 小林広武:「将来の需要地系統の姿と分散型電源の有効活用」, 電中

研究発表会(1997)

- (6) K. Yasuda and T. Ishii: "The Basic Concept and Decentralized Autonomous Control of Super Distributed Energy Systems", *IEEJ Trans. PE*, Vol.123, No.8, pp.907-917 (2003-8) (in Japanese)
安田恵一郎・石井綱吉:「超分散型エネルギーシステムの基本構想と自律分散制御」, 電学論 B, **123**, 8, pp.907-917 (2003-8)
- (7) N. Hara, Y. Yokomizu, D. Iioka, and T. Matsumura: "A Fundamental Approach to Construction of DC power system with Distributed Generators", Record of 2003 Tokai-Section Joint Conference of the Eight Institutes of Electrical and Related Engineers, No.92 (2003) (in Japanese)
原 望・横水康伸・飯岡大輔・松村年郎:「分散型電源を含んだ直流給受電ネットワーク構築のための基礎検討」, 平成 15 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, No.92 (2003)
- (8) Y. Matsumoto and S. Yanabu: "A Vision of the Electric Power System Architecture Aiming for Our New Generation", *IEEJ Trans. PE*, Vol.123, No.12, pp.1436-1442 (2003-12) (in Japanese)
松本吉彦・柳父 悟:「新世代に向けた電力システム構造のビジョン」, 電学論 B, **123**, 12, pp.1436-1442 (2003-12)
- (9) A. Sugimoto, S. Kogoshi, and E. Masada: "The design and Operation of the DC Power System with Photovoltaics for IT Equipments", The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, IEE Japan, PE-03-181/PSE-03-192 (2003) (in Japanese)
杉本明史・小越澄雄・正田英介:「太陽光発電による情報機器への直流給電システムの設計と運用」, 電気学会電力技術/電力系統技術合同研究, PE-03-181/PSE-03-192 (2003)
- (10) M. Honda: "World Trend and Japanese Current Movement on IDC", *J. Institute of Electrical Installation Engineers of Japan*, Vol.23, No.10, pp.731-734 (2003) (in Japanese)
本田雅裕:「世界的な潮流と日本の動向」, 電気設備学誌, **23**, No.10, pp.731-734 (2003)
- (11) Y. Sumiya: "High Reliability of Power System", *J. Institute of Electrical Installation Engineers of Japan*, Vol.23, No.10, pp.738-742 (2003) (in Japanese)
住谷義明:「電源システムの高信頼化について」, 電気設備学誌, **23**, No.10, pp.738-742 (2003)
- (12) 中村公雄:「ブロードバンド時代の高信頼度電源供給 IP 系情報通信機器への直流配電」, 電学誌, Vol.123, No.10, pp.681-684 (2003-10)
- (13) M. Furuse and I. Ishii: "Feasibility Study of Applying Superconducting Cable to DC Distribution System", The Papers of Technical Meeting on Power Engineering, IEE Japan, PE-04-9 (2004) (in Japanese)
古瀬充穂・石井 格:「超電導ケーブルの直流給電への適用の検討」, 電気学会電力技術研究, PE-04-9 (2004)
- (14) Y. Yokomizu, K. Ito, and T. Matsumura: "Approach to Decaying Process of Arc Conductance after Current Zero on the Basis of Thermodynamic and Transport Properties of High Temperature Gases", *IEEJ Trans. PE*, Vol.123-B, No.4, pp.450-456 (2003-4) (in Japanese)
横水康伸・伊藤一将・松村年郎:「高温ガスの熱力学・輸送特性に基づく残留アークコンダクタンスの低下過程の解明」, 電学論 B, **123**, No.4, pp.450-456 (2003-4)
- (15) T. Matsumoto, S. Hirata, Y. Yokomizu, T. Matsumura, A. Ishikawa, T. Furuhashi, and K. Mitsukuchi: "Comparison of Current Interrupting Capability of Rotary-arc Type of Load Break Switch filled with CO_2 , He and H_2 ", The Papers of Joint Technical Meeting on Electrical Discharges, Switching and Protecting Engineering and High Voltage, IEE Japan, ED-03-232/SP-03-154/HV-03-147, pp.135-139 (2003) (in Japanese)
松本 偉・平田修一・横水康伸・松村年郎・石川 晃・古畑 隆・三ツ口邦夫:「 CO_2 , He および H_2 ロータリーアーク型負荷開閉器における電流遮断性能の相互比較」, 電気学会 放電/開閉保護/高電圧 合同研究, ED-03-232/SP-03-154/HV-03-147 (2003)

横 水 康 伸 (正員) 1990 年 3 月 名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。1990 年同大学助手。1997 年同講師。1998 年同大学理工学総合研究センター併任。2000 年同大学助教授、現在に至る。工学博士。環境調和型エネルギーシステムに関する研究に従事。IEEE およびエネルギー・資源学会会員。