

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	Tsusaka Akihiro
氏名	津坂 亮博
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博 甲 第 65 号
学位授与	令和 5 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 3 項該当
論文題目	環境調和形電力系統の構築に関する研究 —太陽光発電装置大量導入時における電力系統の解析技術の確立と高温 SF ₆ 代替ガスの絶縁特性の解明—
論文審査委員	(主査) 教授 雪田 和人 ¹ (審査委員) 教授 大久保 仁 ¹ 教授 鈴置 保雄 ¹ 教授 七原 俊也 ¹ 松村 年郎 ²

論文内容の要旨

環境調和形電力系統の構築に関する研究—太陽光発電装置大量導入時における電力系統の解析技術の確立と高温 SF₆代替ガスの絶縁特性の解明—

本研究は、地球環境に優しい電力系統の構築に関する二つのテーマに取り組んだものである。一つは、再生可能エネルギー利用の一つである太陽光発電装置 (PV 装置) に焦点を当てて、大容量 PV 装置が配電系統に接続された場合に関する課題を解決することを目的としている。もう一つは、電力用ガス遮断器やガス絶縁開閉装置などに用いられている SF₆ ガスの代替ガス探索に関する課題を解決することを目的としている。SF₆ ガスは地球温暖化係数が高いので、COP3 において規制対象ガスに指定されている。

具体的な課題としては、

- ① 配電用変電所の直近に電氣的負荷が集中して存在し、配電線路の末端に大容量 PV 装置が連系され、線路途中に負荷がない長距離配電系統

を対象として、PV 装置連系点電圧の線路長依存性等が明らかにされている。しかしながら、PV 装置から出力可能な最大電流、最大電力、および配電線路に沿った電圧分布に関して、線路インピーダンス、線路長、力率等との具体的な関係性およびそれらの解析技術は確立されていない。これらを明らかにすることにより、太陽光発電装置の発電電力を有効利用する方策が明らかとなり CO₂ 排出削減に貢献する。

- ② SF₆ ガスは、その高い温暖化係数 (CO₂ の 25, 200 倍) のために、代替ガスの探求が進められており、CO₂ ガスを主ガスに用いた混合ガスが代替ガス候補に取り上げられている。混合するガスとしては、自然系ガスでは O₂ が、人工系ガスでは CO₂/O₂/C₅F₁₀O が検討されている。これらの代替候補ガスの常温における絶縁特性は解明されて来ているが、電力用遮断器内で発生するアーク放電によって高温状態になった代替ガスの絶縁特性は明らかになっていない。さらに、

1 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

2 名古屋産業科学研究所 (名古屋市)

電流遮断時にガス遮断器のノズル材料が溶発し、絶縁消弧ガスへ混入すると考えられる。現状ではノズル材料として PTFE が用いられているので、代替ガスに PTFE 溶発蒸気が混入したときの絶縁特性を解明することで、このときの遮断性能を明らかにすることができる。

本論文は、上述した二つの課題の解明に取り組んだ成果をまとめたものである。

本論文は、全 7 章で構成されている。まず、第 1 章では、本研究の社会的背景や課題をまとめるとともに、本研究の目的を明確にした。

第 2 章から第 4 章において、大容量太陽光発電装置の導入時の検討結果をまとめている。

第 2 章では、高压配電系統末端の電圧の逆潮流電流依存性を、電圧・電流ベクトル図上で定性的に表示できることを明らかにした。ここでは、力率 1 運転時および進み力率運転時の両方を取り扱っている。

連系点電圧ベクトルの軌跡を分析することにより、PV 逆潮流電流増加時の PV 連系点電圧の上昇・低下のメカニズムを電気回路論的に明らかにした。さらに PV 連系点電圧の逆潮流電流依存性に関する表式を示すことができた。

第 3 章では、各種有効電力（大容量 PV 装置からの出力電力、配電用変電所（配変）に流入する電力および線路損失）が第 2 章で導出したベクトル図上の三角形の面積に比例すること明らかにし、出力電流および線路距離の関数としてこれらの電力を定式化した。これにより、PV 装置からの出力電力が最大となる条件（PV に許容される最大電力）、および配電用変電所に流入する電力が最大となる条件を定性的かつ定量的に明らかにできた。さらに、PV 装置からの出力電力を増やしていった場合、その電力が小さい範囲では、その電力の増加に伴って配変に流入する電力も増加するが、大きくなりすぎると、かえって配変に流入する電力が低下する局面があることを見出した。すなわち、PV 装置の出力を有効に利用する観点からみれば、PV 装置の連系可能な最大設備容量としては、PV に許容される最大電力を採用するのではなく、配変に流入する電力が最大になる条件を採用すべきであることを

提示した。

第 4 章では、高压配電系統末端に大容量 PV 装置が接続された場合における線路電圧の分布をベクトル図より求め、PV の出力電流および線路距離の関数として定式化し、線路末端だけでなく線路途中における電圧の上昇・低下のメカニズムを明らかにした。これにより、線路途中に導入される電圧制御装置の制御アルゴリズムの変更により有用な知見が得られた。

第 5 章と第 6 章において、SF₆代替ガスの高温状態における絶縁特性に関する検討結果をまとめている。

第 5 章では、重要な系統保護装置であるガス遮断器に焦点を当てた。環境に低負荷な絶縁消弧ガスとして CO₂ を想定し、ノズル材料として PTFE を想定した場合の誘電的破壊特性を求めた。この場合、PTFE はアーク放電によって溶発し、そこから発生する原子・イオン（PTFE 溶発蒸気）が CO₂ ガスに混入する。まず、様々な PTFE 溶発蒸気混入率における粒子組成および電子衝突断面積を用い、換算衝突電離係数および換算電子付着係数を求めた。次に、この換算衝突電離係数および換算電子付着係数から、換算臨界電界を求め、温度 300K-4,000K の範囲での温度依存性を明らかにした。その結果、PTFE 溶発蒸気が 60% 以上混入することで純粋 CO₂ ガスの換算臨界電界よりも上昇することが明らかになった。これは、CO₂ ガス遮断器においては、遮断能力が向上することを示している。

第 6 章では、CO₂/O₂/C₅F₁₀O 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO₂/O₂ 混合ガスとが同じ原子から構成されていることに着目し、これらのガスが高温により一度解離した後の特性に関して、等価になる条件の導出に成功した。ガス遮断器における PTFE ノズルの溶発現象を利用することで、液化リスクの問題から使用が制限されている C₅F₁₀O の混入量が少量もしくはゼロでも C₅F₁₀O 混入時と同等の遮断性能を得ることができる可能性を示した。

最後に、第 7 章で本論文の総論を記述し、本研究で得られた主要な知見をまとめた。

論文審査の結果の要旨

国内におけるエネルギー事業は、デジタル化、自由化、

分散化、脱炭素化など（5つのD）を中心に、IoTなどのデジタル技術と連携あるいは他分野と融合しながら社会インフラを総合的に担う Utility3.0 へ移行しつつある。このうち脱炭素化においては温暖化ガスを 2050 年に 80%削減する目標、分散化においては、再生可能エネルギーである太陽光発電装置などに関する技術革新や普及が要求されている。

本論文は、地球環境に優しい電力システムの構築に関する二つのテーマに取組んだものである。一つは、再生可能エネルギー利用の一つである太陽光発電装置(PV 装置)に焦点を当てて、大容量 PV 装置が配電系統に接続された場合に関する課題を解決することを目的としている。もう一つは、電力用ガス遮断器やガス絶縁開閉装置などに用いられている SF₆ ガスの代替ガス探索に関する課題を解決することを目的としている。具体的な課題としては、

- ① 配電用変電所の直近に電氣的負荷が集中して存在し、配電線路の末端に大容量 PV 装置が連系され、線路途中に負荷がない長距離配電系統を対象として、PV 装置連系点電圧の線路長依存性等が明らかにされている。しかしながら、PV 装置から出力可能な最大電流、最大電力、および配電線路に沿った電圧分布に関して、線路インピーダンス、線路長、力率等との具体的な関係性およびそれらの解析技術は確立されていない。そこで、これらを明らかにすることにより、太陽光発電装置の発電電力を有効利用する方が明らかとなり CO₂ 排出削減に貢献できる。
- ② SF₆ ガスは、その高い温暖化係数（CO₂ の 25, 200 倍）のために、代替ガスの探求が進められており、CO₂ ガスを主ガスに用いた混合ガスが代替ガス候補に取り上げられている。混合するガスとしては、自然系ガスでは O₂ が、人工系ガスでは CO₂/O₂/C₅F₁₀O が検討されている。これらの代替候補ガスの常温における絶縁特性は解明されて来ているが、電力用遮断器内で発生するアーク放電によって高温状態になった代替ガスの絶縁特性は明らかになっていない。さらに、電流遮断時にガス遮断器のノズル材料が溶発し、絶縁消弧ガスへ混入すると考えられる。現状では、ノズル材料として PTFE が用いられているので、代替ガ

スに PTFE 溶発蒸気が混入したときの絶縁特性を解明することで遮断性能を明らかにすることができる。

本論文は全 7 章から成り、第 1 章では本研究の社会的背景や課題をまとめるとともに、本論文の目的を記している。

第 2 章では、高圧配電系統末端の電圧の逆潮流電流依存性を、電圧・電流ベクトル図上で定性的に表示できることを明らかにしている。この検討では力率 1 における運転時および進み力率運転時の両方を取り扱っている。このとき、連系点電圧ベクトルの軌跡を分析することにより、PV 逆潮流電流増加時の PV 連系点電圧の上昇・低下のメカニズムを電気回路論的に明らかにしている。さらに PV 連系点電圧の逆潮流電流依存性に関する表式を述べている。

第 3 章では、各種有効電力（大容量 PV 装置からの出力電力、配電用変電所（配変）に流入する電力および線路損失）が第 2 章で導出したベクトル図上の三角形の面積に比例すること明らかにし、出力電流および線路距離の関数としてこれらの電力を定式化している。これにより、PV 装置からの出力電力が最大となる条件（PV に許容される最大電力）、および配電用変電所に流入する電力が最大となる条件を定性的かつ定量的に明らかにしている。さらに、PV 装置からの出力電力を増やしていった場合、その電力が小さい範囲では、その電力の増加に伴って配変に流入する電力も増加するが大きくなりすぎると、かえって配変に流入する電力が低下する局面があることを見出した。このことは PV 装置の出力を有効に利用する観点からみれば、PV 装置の連系可能な最大設備容量としては、PV に許容される最大電力を採用するのではなく、配変に流入する電力が最大になる条件を採用すべきであることを提示している。

第 4 章では、高圧配電系統末端に大容量 PV 装置が接続された場合における線路電圧の分布をベクトル図より求め、PV の出力電流および線路距離の関数として定式化し、線路末端だけでなく線路途中における電圧の上昇・低下のメカニズムを明らかにしている。これにより、線路途中に導入される電圧制御装置の制御アルゴリズムの変更により有用な知見を得ている。

第5章では、重要な系統保護装置であるガス遮断器に注目している。環境に低負荷な絶縁消弧ガスとして CO_2 を想定し、ノズル材料として PTFE を想定した場合の誘電的破壊特性を求めている。この場合、PTFE はアーク放電によって溶発し、そこから発生する原子・イオン（PTFE 溶発蒸気）が CO_2 ガスに混入する。まず、様々な PTFE 溶発蒸気混入率における粒子組成および電子衝突断面積を用いて、換算衝突電離係数および換算電子付着係数を求めている。次に、この換算衝突電離係数および換算電子付着係数から換算臨界電界を求め、温度 300K-4,000K の範囲での温度依存性を明らかにしている。その結果、PTFE 溶発蒸気が 60%以上混入することで純粋 CO_2 ガスの換算臨界電界よりも上昇することが明らかにしている。さらに CO_2 ガス遮断器において遮断能力が向上することを示している。

第6章では、 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{F}_{10}$ 混合ガスと PTFE 溶発蒸気が混入した CO_2/O_2 混合ガスとが同じ原子から構成されていることに着目し、これらのガスが高温により一度解離した後の特性に関して、等価になる条件を導出している。ガス遮断器における PTFE ノズルの溶発現象を利用することで、液化リスクの問題から使用が制限されている C_5F_{10} の混入量が少量もしくはゼロでも C_5F_{10} 混入時と同等の遮断性能を得ることができる可能性を示している。

第7章で本論文の総論を記述し、本研究で得られた主要な知見を記している。

以上のように、本論文では地球環境に優しい電力システムの構築のために、大容量 PV 装置が配電系統に接続された場合に関する課題と電力用ガス遮断器やガス絶縁開閉装置などに用いられている SF_6 ガスの代替ガス探索に関する課題の一解決方法を示している。本論文は、工学上高い価値を有すると認められる。

よって、本論文を査読審査した結果、博士論文として適格であると判定する。