

# 電気エネルギー現象を定式化によって解き明かす

名古屋大学 大学院工学研究科 電気工学専攻  
教授 横水 康伸

Professor Yasunobu Yokomizu  
Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering  
Nagoya University



## 1 はじめに

電気エネルギーとシステム・機器は「創・送・消」で表現できると思う。わずか3文字であるが、ここには多くの現象が作用するとともに、近年では、地球温暖化現象への対応、太陽光発電設備の大量連系への適用、さらには直流伝送の実施なども作用している。本研究室では、統計力学・物理化学・放電工学などの理論を発展させつつ、システム・機器の特性・現象解明と高性能化を目的として、研究を進めている。数値計算および測定によって特性を見出しているが、因果関係がややimplicitに感じることもある。本研究室では、もう一步進めて、特性を影響要因で定式化することも進めている。定式化によって、「複数の要因候補のうち、何」が「どの程度、どのように」特性を決めているのかをexplicitに示すので、特性の解釈に大変有効であり、ひいては技術開発ポイントの提案につながる。

「送」に関わる定式化の例としては、受電端に電圧特性指数 $\alpha_{\text{mix}} (< 1)$ の“消”費負荷が接続された低電圧DC配電システムに関して、電源電圧の微小変動による負荷端電圧 $V_R$ の振動現象を考察し、次いで、この振動現象にHurwitz安定判別式を適用することによって、DC配電システムでの受電可能電力の上限値を

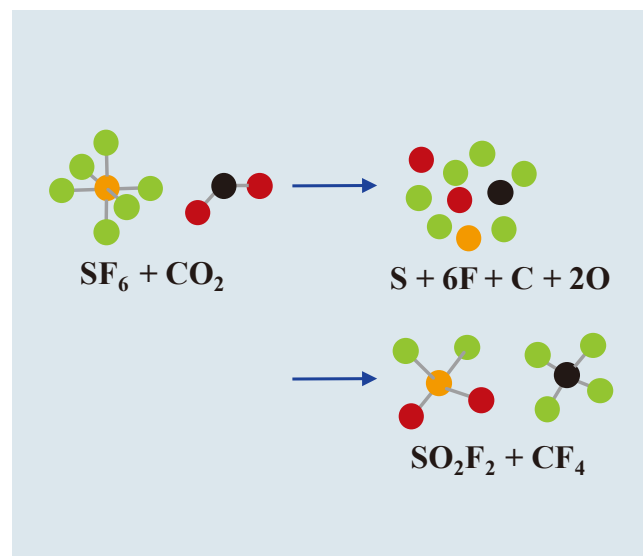
$$P_{\text{lim},R} = \frac{RV_R^2}{(1-\alpha_{\text{mix}})L/C}$$

で関数表記できることを解き明かしてきた（配線抵抗 $R$ が高い場合には、振動を抑制するので、 $P_{\text{lim},R}$ は増加。しかし、 $R$ による線路損失 $P_{\text{loss}}$ は高まるので、 $P_{\text{lim},R}$ と $P_{\text{loss}}$ との兼ね合い）。

本稿では、最近での取り組みとして、高電圧遮断器における分解生成物、特に凝縮層炭素の生成防止条件、また配電システムでの逆潮可能電力などについて述べる。

## 2 「送」の一つ(高電圧遮断器での代替消弧ガス：アーク消弧後における生成化学種)

「送」を支える機器の一つであるガス遮断器では、消弧ガス $\text{SF}_6$ が高い地球温暖化係数を有することから、排出量削減ガスとして指定されている。筆者らは代替消弧ガスの可能性を探るため、これまでに $\text{SF}_6/\text{CO}_2$ 混合ガスでのアーク消弧後の副生成物を、統計力学・物理化学理論を用いて、検討してきた。その結果、第1図に示すように $\text{SF}_6 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{S} + 6\text{F} + \text{C} + 2\text{O} \rightarrow \text{SO}_2\text{F}_2 + \text{CF}_4$ が起こること、言い換えれば、 $\text{SF}_6$ は（単独ガス使用では安定であるが）、混合ガス使用では熱解離・結合プロセスで他の気相化学種に変わることがあることを示してきた<sup>(1)</sup>。



第1図  $\text{SF}_6/\text{CO}_2$ 混合ガスにおける熱解離・結合反応

数年前から、ヨーロッパのある電力機器製造会社は代替消弧ガスとして、 $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_5\text{-FK}$ （化学式 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ ）混合ガスを提案している<sup>(2)</sup>。上述での結果<sup>(1)</sup>を踏まえると、この混合ガスでのアーク遮断後にはガス温度が常温にもどっても元の気相分子に結合しないことが考えられる。そこで、筆者と共同研究者は、同混合ガスを構成する元素に対して47種の反応（ $\text{C} + \text{O} \rightarrow \text{CO}$ および $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$ など）および炭素の相変化反応を考慮して、ガス温度20000 Kから300 Kに向かって、アーク遮断プロセスにともなう化学組成を数値計算によって導出した。本研

究での計算手法では、従来での計算手法とは違って、構成種の数分率 $y_j$ を未知数に用いないことも、特徴の一つである。その結果、常温300 Kで安定な気相化学種を見出し、また、初期構成分子数に依存して生成化学種が変わること、さらに凝縮層炭素（以下、C (c)）が300～1,000 Kで初期構成分子数に依存して生成されることを明らかにした。次段階として、得られた化学組成の分析から、主要な結合反応とその優先性を解き明かし、ついにはアーク遮断プロセスによる結合反応式をまとめ上げた。この反応式から、

“C (c) の生成防止条件を定式化できること、その条件は $C_5F_{10}O$ 分子数 $Y_{CFO}$ と $O_2$ 分子数 $Y_{O_2}$ で表される（ $CO_2$ 分子数 $Y_{CO_2}$ は関与しない）こと”

を明らかにできたのである<sup>(3)</sup>。C (c) 生成防止条件を満たさない混合ガスでは、アーク遮断プロセスを通じて、気相炭素が約1,000 K以下でC (c) に相変化してしまい、C (c) はアーク遮断後に消弧室に残存し、固体表面での電気絶縁性能を低下させる恐れがある。

### 3 「創と送」(太陽光発電設備が連系された高圧配電線における逆潮可能電力)

FIT (Feed-in Tariff：固定価格買い取り制度) の導入後、「創」である大容量太陽光発電設備（以下、PV）が長距離配電線の末端部に連系されるケースが増加している<sup>(4)</sup>。しかし、線路リアクタンス $X$ に対して線路抵抗 $R$ を無視できない配電線に関して、「送」の限界である逆潮可能電力はほとんど検討されていない<sup>(4)</sup>。

そこで、筆者の研究室メンバーと共同研究者（中部電力株式会社および愛知工業大学など）は、配電システムでの逆潮可能電力に取り組み、システム末端部にPVが連系され、末端部と配電変電所の送り出し端（以下、S端）との間に自動電圧調整器（以下、SVR）が設置された状況を取りあげた。第一段階として、S端電圧 $V_S$ を基準ベクトルとして、PVの出力電圧 $V_{PV}$ 、SVRの1次電圧 $V$ 、2次電圧 $V'$ 、PVの出力電流 $I_{PV}$ 、配電線に流れる電流 $I$ についてベクトル図を描いた。第2段階として、幾何学的考察を実施できるように各ベクトルの終点周辺に図形を追加し、さらに三角関数の公式を利用し、 $V_S$ および $V_{PV}$ に関する代数方程式を導出した。この方程式に考察を加えることによって、逆潮可能電力 $P_{lim}$ の定式化を達成できた。本稿では、PVが $\cos \psi = 1$ で発電し、配電システムには1台のSVRが設置されている場合を述べれば、

$$P_{lim} = \frac{1}{2(a^2X_1 + X_2)} (D + \sqrt{D^2 + 1}) V_S^2$$

である。ここで、 $D = (a^2R_1 + R_2)/(a^2X_1 + X_2)$  であり、さらに、 $R_1$ および $X_1$ ：PV-SVR間の配電線の抵抗およびリアクタンス、 $R_2$ および $X_2$ ：SVR-S端間の配電線の抵抗およびリアクタンス、 $a$ ：SVRの変圧比である。S端からみたリアクタンスの他に、配電線の抵抗がリアクタンスとの比の形で、逆潮可能電力 $P_{lim}$ に影響するのである。なお、本研究は、SVRの設置台数 $n$  ( $\geq 1$ ) およびPV運転力率 $\cos \psi$  ( $\leq 1$ ) 下における逆潮可能電力 $P_{lim}$ の定式化に発展させている<sup>(5)</sup>。

## 4 「消」の一つとして(あとがき)

“消” 費機器として、自動車内DCシステムでのモータを取り上げれば、電機子の回転運動過程でブラシ・整流子片間にアーク放電が繰り返し発生し、ブラシ損耗を引き起こしてしまう<sup>(6)</sup>。筆者らは、このアークエネルギー $W_a$ を複数の因子で、しかもMaclaurin展開の適用によって主たる因子に絞り込んだ式の形で表している。この式から、 $W_a$ の低減技術ポイントとその効果を明確に理解できる。今後、学会などで式を発表予定である。

### 参考文献

- (1) Y. Yokomizu, T. Matsumura, M. Sato, and K. Horinouchi. "Predominant Particles in  $SF_6$ - $CO_2$  Mixture at Temperatures of 300-30,000 K", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 133, No. 11, pp. 818-825 (2013).
- (2) M. Saxegaard, E. Attar, M. Kristofferen, H. Landsverk, O. Granhang, A. Di-Gianni, and S. Scheel. "Low-Current Interruption in  $SF_6$ -Alternatives", 24th International Conference on Electricity Distribution, Paper 0614 (2017) Glasgow.
- (3) 横水、兒玉、佐藤、小倉：“代替消弧ガス $CO_2/O_2$ への $CF_3CF_2H_2$ 、 $C_4$ -FNあるいは $C_5$ -FKの混合：凝縮相炭素の生成と気相化学種”、平成31年電気学会全国大会講演論文集、6-072
- (4) 岩月：“長距離配電線で太陽光発電の連系により電圧安定限界に至った場合の影響”、中部電力株式会社 技術開発ニュース、No. 160, pp. 19-20 (2019)
- (5) 立脇、舟見、横水、松村、雪田、後藤、石川、岩月、上西、飯岡、清水。“太陽光発電装置が接続された高圧配電線における逆送可能電力—自動電圧調整器を考慮—”、電気学会研究会資料 電力技術/電力系統技術合同研究会、PE-18-138/PSE-18-114 (2018)
- (6) 塚塚、横水、浅井、野須。“エタノール中DCモータにおける整流過程のアーク発生現象：ブラシ・整流子の接触状態に基づく考察”、電気学会論文誌B, Vol. 139, No. 5, pp. 293-301 (2019)

### 横水 康伸（よこみず やすのぶ）氏 略歴

名古屋大学助手、講師、助教授、准教授を経て、現在、同大学教授。この間、The University of Liverpool, Visiting Fellow。工学博士。高温ガスの熱力学・輸送・電気絶縁特性の解明、直流および交流大電流遮断の特性解明と高性能化、次世代配電・直流給電設備のシステム・要素技術、パワー半導体適用技術に関する研究に従事。