電力・エネルギー分野における大電流制御・応用技術

正 員 稲葉 次紀*

Control Technology of High Current and its Application on Power and Energy Systems

Tsuginori Inaba*, Member

In this paper the basic control and application technologies in high current energy systems are described. The control technology consists of mainly current capability and electro-motive force of conductors and arc plasma phenomena such as the radiant power and torches. And the application deals with mainly concept of applications and the plasma treatment of hazardous wastes.

キーワード：大電流，エネルギー，制御，応用，アークプラズマ，環境

Keywords: high current, energy, control, application, arc plasma, environment

1. 緒 言

電気エネルギー量の増加および利用エネルギー形態の高機能化に伴い、これを制御・応用する上で大電流技術は急速に発展している。それらは、従来の大電力送電、大電流試験における大電流技術に加え、核融合、強磁界、磁気エネルギー貯蔵、電磁力応用、パルスパワー、廃棄物処理など、先端技術の分野で多方面に採用されている⁽¹⁾⁽²⁾。大電流技術は、(1)制御技術と、(2)応用技術、に分類できる。大電流を用いる特徴は、ローレンツ力、磁界、ジュール熱・光エネルギー、通過電荷量が大ききことにある。さらに、高い制御性を生かして、レーザガン、超電導磁気エネルギー貯蔵、アーク加熱などに大電流技術が利用されている。

2. 大電流エネルギー制御技術

電力機器の大電流化に伴い、これらの基礎となるのは電磁界現象であり、伝送技術とアーク現象が重要である。

〈2・1〉大電流の伝送 大電流用導体は電線の許容温度、熱伸縮による変形、電磁力が大切である。

〈2・1・1〉大電流用電線の電流容量 電流容量は、裸電線では導体の機械的強度を、絶縁電線ケーブルなどでは絶縁体の絶縁性能を考慮した許容温度で定められる。ケーブルでは、絶縁体の熱抵抗、表面放散熱抵抗、土壤熱抵抗なども考慮する。例えば単心・気中布設の連続許容電流⁽³⁾⁽⁴⁾は600 V、1000 mm² 架橋ポリエチレン絶縁ケーブ

ルの場合1270 Aとなる。裸電線の許容電流は、対流・放射による熱放散を基に計算する⁽⁵⁾。ただし、温度上昇は、導体の形状・配置により異なる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。数時間以内の過電流に対しては熱時定数を考慮した短時間許容電流が適用される。短時間許容温度は連続時の10~30°C増とする。短絡電流に対しては導体のみの熱容量で計算する⁽³⁾。

バスダクトではJIS⁽⁸⁾に定格電流の規定がある。

〈2・1・2〉熱 応 力 大電流導体では、発熱による熱伸縮を考慮する。線路を固定して長手方向の熱伸縮を拘束した場合、拘束点に作用する力は、熱膨張による伸び量と圧縮応力による縮み量が等しいとして与えられる。熱応力は、導体の温度変化が熱容量のため比較的緩慢なことから、繰返し頻度は電磁力よりもはるかに少ないが、材料の機械的強度を考えるとときには疲労特性⁽⁹⁾も考慮する。

〈2・1・3〉電 磁 力 電磁力は熱応力と異なり、線路の微小変形では変化しない。導体の長手方向の移動を拘束すると、熱応力対策が重要となる。平行往復回路の場合、電磁力は線路間隔を広げる方向に働く。

同軸円筒構造である場合、内部導体に圧縮応力、外部導体には拡張応力が働く。内部導体が偏心している場合には、導体周上で応力分布が変化する。平行線路の場合、電磁力は絶縁材で支持するが、同軸構造の場合、電磁力は大部分が内部応力となるので、絶縁体に働く力は比較的小さい。

多心導体や曲がり部など不均一部分の電磁力は、解析的手法によるか⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、計算機を必要とする。0.8 m 間隔のDC ブスに短絡用導体を取り付け、52 kA の電流を流す場合を図1に示す。(a) 図はケーブル短絡の場合で、発生する電磁力は広がる方向で、最大0.24 t/m の力が作用する。(b) 図は銅バー短絡の場合で、力は(a) 図の半分に減少す

* 中央大学

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

Chuo University

1-13-27, Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551

図 1 平行 DC ブス終端短絡回路の電磁力
Fig. 1. Electro magnetic force on short circuit between parallel DC buses.

図 2 高温空気の粒子組成の温度特性
Fig. 2. Particle density of high temperature air.

る。機器に補強導体が使用されることがあるが⁽¹²⁾、伝送路には熱応力対策が困難なためあまり使われない。

〈2・2〉 アーク現象 アーク放電は、開閉装置の電極間や、系統の故障点に発生するほか、照明用光源、アーク炉まで広範囲にわたる。

〈2・2・1〉 高気圧アークの物性 数千度以上の高温で、ガスは、熱解離して原子状態に、さらに電離してイオンとなる。ガス温度は電子温度とほぼ等しい⁽¹³⁾。アーク（陽光柱）を熱プラズマとも呼ぶ⁽¹⁴⁾。アークが熱平衡にあれば、構成分子および原子の運動、励起などが同じ温度で記述でき、アーク内の電界や温度分布などが算定できる。粒子組成は、Saha の平衡式に基づいて導かれ、高温空気については、数多くの公表例がある^{(15) (16)}。一例を図 2 に示す⁽¹⁷⁾。比熱やエンタルピーなどの熱力学特性や、導電率や熱伝導率などの輸送特性も求められている⁽¹⁸⁾。

〈2・2・2〉 アーク放電の放射エネルギー特性 分光分布の測定例を図 3 に示す。放射光には、紫外から赤外までの連続スペクトルと輝線スペクトルが重畳している。

(1) 連続スペクトル 制動放射と再結合放射が重要である。自由電子がイオンの電界で減速されるときに放出されるのが制動放射であり、比較的超高温で発生する。再

図 3 分光分布の一例（アルゴンガスアーク）
Fig. 3. Spectro-scopic distribution (Ar arc).

図 4 アルゴンガスの放射パワーの温度特性
Fig. 4. Radiant power of Ar gas vs. temperature.

結合放射はイオンと自由電子が再結合する際に放出され、その放射係数は概略、電子密度とイオン密度に比例し、温度の平方根に反比例する。また、数千度程度では電子と中性粒子間の衝突や電子付着による連続スペクトルが放出される。

(2) 輝線スペクトル 粒子がエネルギー状態上単位 n から下単位 m に遷移するとき放出され、その放射係数は⁽¹⁹⁾ 概略、粒子数密度に比例する。

(3) 放射パワーの温度特性 特性例を図 4 に示す⁽²⁰⁾。10,000 K 以下では原子による線スペクトルが、10,000 K~20,000 K では連続スペクトルが、20,000 K 以上ではイオンによる線スペクトルが主流を占める。

(4) 放射パワーの測定 測定例を図 5 に示す。電流 10 kA で約 7 MW/m 以上に達し、電流の約 1.1~1.2 乗に比例する。このべき乗数は、計算値と良く一致する⁽²¹⁾。

〈2・2・3〉 トーチプラズマの基礎特性 アークプラズマを小口径ノズルを通して絞り、軸流外層気流で安定化するトーチが開発され、切断、溶融、溶射などで使用されている⁽²²⁾。磁気や気流による外乱をも模擬できる利点があるため、安定化アーク特性に及ぼすパラメータの影響を、半径を考慮した規格化特性を踏まえて、試算している^{(23)~(25)}。

(1) トーチプラズマの通常姿態と発光半径 通常姿態を、図 6 に示す。発光半径は対向電極に向けて、徐々に、また、大電流になるほど増大する。

(2) 端子間電圧—ガス流量特性 トーチプラズマの端子間電圧は、ガス流量の増加に対して、直線的に増加し、外部プラズマ長と共にその直線勾配も増大する。

(3) トーチプラズマの特徴⁽²²⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾ (a) 温度が1~3万度に達し、100 kW/cm² 程度の高エネルギー流を形成する。このため、急速加熱+溶融、切断が可能である。(b) 分子が原子、イオン、電子に分解されており、従来困難な高温化学反応に利用できる。(c) 数十 m/s 以上の高速が容易に得られるため、プラズマ中に硬い微粉体を送り込み、被照射表面を超硬度に溶射できる。(d) 時間的制御が容易なため、プラズマの発生・停止が簡素化され、装置を小型化できる。(e) 使用ガスの種類により、雰囲気酸化する・還元・不活性と自由に選択できる。(f) 輝度が高く安定なため、大形の照明灯や標準光に利用できる。(g) 均一で、しかも再現性に優れているため、材料の耐熱評価試験に利用できる。

〈2・2・4〉アークの遮断現象 遮断器において、金属接触が失われる瞬間に、接触子金属の蒸発を生じ、周囲気体が導電性をもつ⁽²⁸⁾。交流の場合、電流零点において、入力

体に変容する。通電機能と絶縁機能とを、電流零点を境として切り換えることを、アークの過度応答を通じて行うのが遮断器である。遮断現象の解析は Cassie⁽²⁹⁾、Mayr⁽³⁰⁾ らによって始められ、損失は熱伝導損、対流損、放射損、拡散損、膨張冷却損で表わされる。対象アークごとに重要項目のみを摘出して、解析される。安定化アークでは熱伝導損が、ガス吹付けアークでは、加えて対流損が支配的である。大電流アークでは、放射損が無視できない。

3. 大電流エネルギー応用技術

大電流エネルギー応用技術として、核融合発電技術、MHD 発電、超電導エネルギー貯蔵 (SMES) 技術などの新エネルギーに関連した技術と、熱、光、磁界、圧力、電磁力の発生量が大いという特徴を利用した各種応用技術、さらには新分野であるアークプラズマを利用した環境対策技術が開発・実用化されている。図 7 は、これらの代表的な大電流機器を特徴的な電圧—電流で分類したものである。インピーダンスで $1\mu\sim 1k\Omega$ 、時定数で $1n\sim 1k$ 秒と、広範囲にわたって応用されている。本章では、新技術である環境応用技術について記述する。

〈3・1〉アークプラズマ処理の概要⁽³¹⁾ アークプラズマの特徴と適用例を図 8 に示す。そのうち有害廃棄物のアークプラズマによる分解・処理例を表 1 に示す。アークプラズマは廃棄物処理において極めて有用である。主な項目としては、フロンガスの分解、燃焼排ガス中の NO_x、SO_x 成分の除去、注射針等の医療ごみの処理、PCB の処理、放射性廃棄物の処分、焼却飛灰の処理⁽³²⁾、アスベストの処理などが挙げられる。

〈3・2〉リサイクル・回収へのアークプラズマの応用 原子炉燃料の被覆管などに使用されている Zr 合金 (ジルカロイ) からの Zr (ジルコニウム) の回収や、白金などの有益な金属分の回収などが一部企業化されている。上記以外の応用として、ダイヤモンドの合成、薄板の表面処理、酸

図 5 アルゴンアークの放射パワーの測定例
Fig. 5. Measured radiant power of Ar arc.

図 6 トーチプラズマの通常姿態の例
Fig. 6. Steady state of torch plasma.

図 7 大電流エネルギー機器の分類
Fig. 7. Classified apparatus for high current energy (Current vs. Voltage).

図 8 アークプラズマの特徴と適用例

Fig. 8. Characteristics of arc plasma and its applications.

表 1 アークプラズマ加熱の廃棄物処理応用分野

Table 1. Waste treatment by arc plasma heating.

低レベル放射性廃棄物
有害排ガス (フロン, NO _x , SO _x ほか)
医用廃棄物
PCB 含有体
アスベスト廃材
化学廃棄物
都市ごみ焼却灰
無害化処理サイクル

化物高温超電導体薄膜の生成, 太陽電池用の Si 製造技術への適用, また, 加熱・照明機器への応用として大規模照明や急速光エネルギー加熱など挙げられる。また, アルミニウムやステンレス, 銅などの金属の切断・溶解・精錬, 大気圏へのロケットの再突入模擬試験などへの応用がある。

〈3・3〉放射性廃棄物のプラズマ処理 低レベル放射性雑固体廃棄物のプラズマ溶融処理^{(33)~(35)}として, (a)核種挙動, (b)溶融固化体の物性などが検討されている。また, TRU (超ウラン元素) 廃棄物のプラズマ溶融処理⁽³⁶⁾として, (a)融点の高いハル・エンドピースの溶融や (b)TRU 核種挙動が検討されている。

4. むすび

本解説では, 電力エネルギー分野における大電流制御・応用技術として, 最初, 制御技術の基礎現象を述べ, 次いで応用技術の全体像と, 新技術として注目されている大電流アークプラズマの環境応用技術について言及した。大電流技術が極めて広範囲に及ぶため, 全体像は把握しにくいと思うものの, 一端でも理解して頂ければ幸甚である。

謝 辞

本稿を作成するにあたり, 名古屋大学の松村年郎教授, ならびに埼玉大学の前山光明助教授から貴重な助言と資料を戴き感謝いたします。

(平成 14 年 12 月 17 日受付)

文 献

- (1) 電気学会: 大電流工学ハンドブック, コロナ社 (1992)
- (2) 電気学会: 大電流エネルギー工学, オーム社 (2002)
- (3) 電線工業会: 「電力ケーブルの許容電流」, JCS-168D (1980)
- (4) 飯塚: 電力ケーブルハンドブック, p.383, 電気書院 (1980)
- (5) 電線工業会規格: 「裸線許容電流の計算基準」, JJCS-374 (1981)
- (6) 大森・嶋田: 「連続パルス通電時における導体の温度上昇」, 電気学会大電流制御調査専門委員会資料, No.94 (1985)
- (7) E. Noguchi, N. Matsuo, H. Yukiyoishi, and Y. Yamada: "Temperature analysis at pulse type power supply for aluminum bus bar", *Showa Densen Cable Review*, Vol.35, No.2, pp.39-44 (1985) (in Japanese)
- (8) 野口・松尾・雪吉・山田: 「アルミブスバーのパルス通電における温度解析」, 昭和電線電線レビュー, 35, No.2, pp.39-44 (1985)
- (9) 日本工業規格: 「バスダクト」, JIS C 8364 (1979)
- (10) 例え, 日本金属学会編: 「疲れ」, 金属便覧, pp.3-9, 丸善 (2000-5)
- (11) 高分子学会編: 「疲れ」, 高分子材料便覧, pp.2-24, コロナ社 (1973) など
- (12) P. Dokopoulos: "Short circuit forces in three-phase tubular bus bars with steel enclosures", *ETZ*, Bd.7, H.11 (1985)
- (13) M.K. Cohar, et al.: "Design of High Current Bolted Bus-Bar Joint I-D.C Systems", *IEEE PES*, A 79-425-0 (1979)
- (14) 三木: 「米国次期核融合装置における強化導体の設計状況について」, 電気学会大電流制御調査専門委員会資料, No.126 (1985)
- (15) J.M. Somerville: *The Electric Arc*, p.23, Methuen & Co (1959)
- (16) S. Flugge: *Handbuch der Physik*, Vol.22, p.305, Springer (1956)
- (17) A.S. Predvoditelev, et al.: *Tables of Thermodynamic Functions of Air*, Inforserch Ltd. (1958)
- (18) Landolt-Boernstein: "Zahlenwerte und Funktionen", *Kalorisch Zustand Grossen*, Vol.11, No.4, p.724, Springer (1961)
- (19) 作田・古田・榊原・鬼頭・宮地: 「N²⁺ 分子スペクトルの帯頭を利用した空気アークの温度測定」, 電気学会研究会資料, EP-77-31 (1977)
- (20) J.M. Yos: "Transport Properties of N₂, H₂, Air to 30000 K", *Amendments to AVCO RAD-TM-63-7* (1967)
- (21) W.L. Wiese, M.W. Smith, and B.M. Glennon: "Atomic Transition Probabilities", *NBS*, I (1966)
- (22) T. Matsumura, H. Futamata, Y. Yokomizu, and Y. Kito: "Total Radiation Power of 20kA-Class SF₆ Gas-Blast Arcs", *T. IEE Japan*, Vol.114-A, No.9, pp.585-590 (1994-9) (in Japanese)
- (23) 松村・二俣・横水・鬼頭: 「電流域 20kA までの SF₆ ガス吹付けアークの全放射パワー」, 電学論 A, 114, 9, pp.585-590 (1994-9)
- (24) T. Inaba, M. Kusunoki, T. Iwao, and M. Endo: "Analytical Simulation of Current and Power Parameters on Radiation Energy from High Current Wall-Stabilized Arcs", *T. IEE Japan*, Vol.118-A, No.1, pp.10-15 (1998-1) (in Japanese)
- (25) 稲葉・楠・岩尾・遠藤: 「大電流器壁安定化アークの放射パワーに及ぼす電流と電力パラメータの解析的試算」, 電学論 A, 118, 1, pp.10-15 (1998-1)
- (26) T. Inaba and M. Shibuya: "Applications and prospects of plasma torches", *J. IEE Japan*, Vol.107, No.10, pp.1019-1022 (1987-10) (in Japanese)
- (27) 稲葉・渋谷: 「プラズマトーチの適用例と今後の展望」, 電学誌, 107, 10, pp.1019-1022 (1987-10)
- (28) 稲葉・渡辺・渋谷, 他: 「トーチ」, 平成 7 年電気学会全国大会, No.137 (1995-3)
- (29) T. Inaba, Y. Watanabe, M. Endo, and M. Shibuya: "Basic parameters and measured properties of torch plasma characteristics", *The Papers of Technical Meeting, IEE Japan*, SP-95-15, HV-95-22, pp.61-70 (1995) (in Japanese)
- (30) 稲葉・渡辺・遠藤・渋谷: 「トーチプラズマ特性の基本パラメータと実測特性」, 電気学会開閉保護研究会資料, SP-95-15, HV-95-22, pp.61-70 (1995)

- (25) 渡辺・稲葉・遠藤, 他:「トーチプラズマ特性 (3) ガス流量の端子間電圧への影響」, 平成 8 年電気学会全国大会, No.76 (1996)
- (26) T. Inaba: "The Status of R&D of Thermal Plasma in Japan", Int. Symp. Env. Tech., Atlanta, p.13 (1995)
- (27) 稲葉: エネルギーフォーラム, No.395, pp.156-157 (1987)
- (28) 作田・鬼頭・宮地:「銅蒸気が混入した高温空気の導電率, 熱伝達率及びエンタルピー」, 電学論 A, Vol.101, No.4, pp.241-248 (1981-4)
- (29) A.M. Cassie: "Theorie", CIGRE Paper, No.102 (1939)
- (30) O. Mayr: "Beitrage", Arch. Electrotech., Vol.37, p.588 (1943)
- (31) 稲葉:「草のみどり」, 中央大学, 第 110 号, pp.24-27 (1997)
- (32) Y. Kubo, T. Hosoi, Y. Kaneko, M. Ohata, T. Iwao, N. Furuta, and T. Inaba: "Investigation of pH Dependency of Solubility and Physical Property about Plasma Molten Slag from Fly Ash", T. IEE Japan, Vol.121-D, No.4, pp.493-500 (2001-4) (in Japanese)
久保・細井・金子・大畑・岩尾・古田・稲葉:「プラズマによる焼却飛灰溶融スラグの pH 別溶出試験と物理的特性の検討」, 電学論 D, 121, 4, pp.493-500 (2001-4)
- (33) T. Amakawa, K. Adachi, and S. Yasui: "Simultaneous Melting of Low Level Miscellaneous Solid Wastes by Thermal Plasma", CRIEPI Report, W12, (1998) (in Japanese)
天川・足立・安井:「プラズマ加熱を用いた低レベル放射性雑固体廃棄物の一括溶融処理技術」, 電力中央研究所横須賀研究所総合報告, W12 (1998)
- (34) T. Amakawa, K. Adachi, and S. Yasui: "Fundamental Research on Thermal Plasma Technology for Treatment of Low Level Radioactive Solid Waste Part II Influence of Waste Composition on Material Properties of Solidified Products", T. IEE Japan, Vol.119-A, No.3, pp.357-364 (1999-3) (in Japanese)
- 天川・足立・安井:「低レベル放射性雑固体廃棄物のプラズマ溶融処理技術の基礎検討 その 2 溶融固化体の性状に与える廃棄物組成の影響」, 電学論 A, 119, 3, pp.357-364 (1999-3)
- (35) K. Adachi, S. Yasui, and T. Amakawa: "Thermal plasma melting technology for low level radioactive mixed solid waste", Electroheat, No.90, pp.38-42 (1996-10) (in Japanese)
足立・安井・天川:「低レベル放射性雑固体廃棄物の熱プラズマ溶融技術」, エレクトロヒート, No.90, pp.38-42 (1996-10)
- (36) T. Amakawa, K. Adachi, S. Yasui, and S. Furukawa: "Migration behavior of radionuclides during plasma melting of TRU wastes", pp.90-91 (1999) (in Japanese)
天川・足立・安井・古川:「TRU 廃棄物のアークプラズマ溶融処理技術」, 平成 11 年度火力原子力発電大会要旨集, pp.90-91 (1999)

稲葉次紀 (正員) 1971 年名古屋大学大学院博士課程満了。同年工学博士。三菱電機 (株), アデカ・アーガス化学 (株), (財) 電力中央研究所を経て, 現在, 中央大学理工学部教授。1978 年 Braunschweig 工科大学客員教授。1988 年電気学会評議員。現在, 静止器 (技) 委員長ほか。電力エネルギー・大電流アークプラズマ・有害廃棄物処理の研究に従事。