

過渡的電力制御

Control of Transient Electric Power

稲葉 次紀*

Tsuginori Inaba

1. はじめに

電気をエネルギーの輸送手段として利用する場合、単位時間あたりのエネルギー輸送量は電力（電圧×電流）で表示される。この値が一定であれば電力輸送に伴う設備も比較的簡単となろうが、通常は電力の需要が、季節や曜日、時刻などの時間的或いは社会的要因や、圧延機など間欠的稼働による負荷的要因、万一の事故対応など各種の要因で変動し、それぞれに対して最適な過渡的電力制御対策が要請される。短絡事故など特殊な例外を除いては、電圧は大略一定に保持されるので、電力を制御するには、いかに適切に電流を制御するかが重大なポイントとなる。ここでは、主としてパルスパワーに主眼が置かれているため、社会的要因などが分（min）以上の対応時間は除外し、一応、秒（s）～サイクルに対応するミリ秒（ms）級の過渡的電力制御を対象を絞ることにする。実際の電力は発電所で発生され、送電線や配電線を通じて工場など各需要家へ送られるが、供給の信頼性を増すために、各種の試験設備を用いた模擬実験による過渡制御技術の向上も常日頃から図られているので、試験技術をも含めて電力の過渡的制御に関連する主な設備と現象を以下に述べる。大電流、ひいては大電力の制御技術に関

しては、最近ますます関心が高まり、多方面で目的毎に対応策が集大成されており、詳しくはそれらの報告を参照していただきたい¹⁾²⁾³⁾。

2. 電力の発生制御

2.1 大容量交流発電機の出力制御

通常の火力発電所や水力発電所で使用される大容量発電機の出力制御は入力エネルギーである蒸気や水量を調整して発電機の回転数を変化させたり、発電機に作用する磁力を変化させて行われることが多い。特に、ミリ秒級の負荷変動により、周波数も変動してしまうため、短時間で周波数を一定幅内に収めるように出力制御が成されている。

それに対して、特定の電力を短時間だけ必要とするような大容量試験発電機としては、短絡発電機やフライホイール発電機が用いられる。両者ともエネルギーを回転体の機械エネルギーとして蓄え、必要な時に、周囲に設けられた巻線により電力エネルギーに変換して取り出す。前者は主として遮断器や避雷器など電力機器の性能検証用として、後者はトカマクなど臨界プラズマ試験用駆動電源としての利用例がある。図-1に短絡試験設備の構成例を示す⁴⁾。

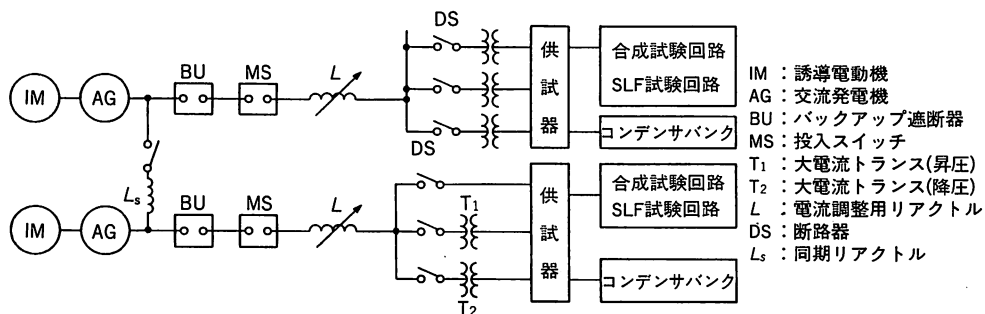


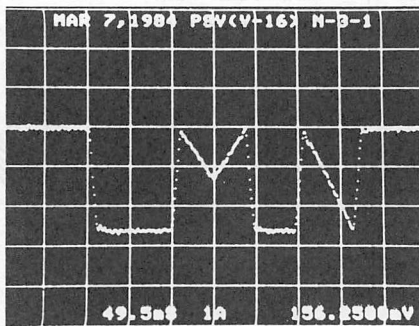
図-1 短絡試験設備の基本構成

* (財)電力中央研究所 横須賀研究所 電力部 大電流研究室室長
〒240-01 横須賀市長坂2-6-1

2.2 大容量直流発生装置

(1) 大容量変換装置

通常、電力は交流で使用されるが、条件により、直流の方が負荷制御の観点から適している場合がある。例えば、我が国では主として東日本が50Hz（ヘルツ）、西日本が60Hzの周波数で運転されており、両者の接点である新信濃地区等では周波数変換用に大容量の交直変換装置が設置されている。また、プラズマ試験用として、前述したフライホイール発電機の交流出力を直流に変換する装置も実用化されている。変換方式としては、一般にシリコン整流素子またはサイリスタを組み合わせた三相ブリッジ回路（六相整流）が用いられており、ゲートにより遅れ角を制御して出力電圧を連続的に変えている。特殊用途としてGTO（ゲート阻止形）素子などを用いたPWM（パルス幅変調）制御、チョップ制御なども採用されている。特に、位相検出回路にPLL（位相連続ロック回路）を取り入れて波形のひずみを無くするとともに、すべての信号をデジタル制御により集中制御した電算機直接制御（DCC）を開発している。サイリスタの制御方式に現代制御理論を用いることで、50kAの大電流負荷を数msの高速応答時間、0.1%の高精度で制御可能とした出力電流波形例を図-2に示す⁵⁾。



1.875kA/div 49.5ms/div

(DCC CAMACシステムの制御特性)

図-2 垂直磁界コイル電源のステップ応答電流波形

(2) ホモポーラ発電機

通常の巻線式発電機では整流子を介して出力を取り出すため、高電圧の場合には採用できても、低電圧で大電流が必要な場合には不適切である。そのような場合には回転子を超高速で廻す単極（ホモポーラ）発電機が好適である。この方式では集電子が一对必要であるが整流子は必要なく、磁界が変化しないため鉄損も生じない。蓄積エネルギーが10MJの例では、7330rpm

の回転数で、電圧7V、電流1460kAの出力を30msの短時間放出可能である⁶⁾。

3. 電力の輸送線路

電力の輸送を司る線路自体は過渡的電力制御に関係ないように思われるが、①過渡現象は高周波を伴うため、通常の商用周波数とは異なった線路の損失特性を示す。②過渡的に大電流を伴うため、熱的・電磁力的な配慮が必要である。

3.1 線路の損失特性

導体に交流を流すと、電流による磁界の作用を受けて導体抵抗が増加する。このうち、導体の内部磁界による導体自体への作用が表皮効果であり、他の導体からの外部磁界による作用が近接効果と呼ばれる。

円柱（中実）導体を例にとると、周波数が増加すれば、直流抵抗分は増加し、交流抵抗分（内部インダクタンス）は一度は増加し、次いで減少する。商用周波時の合成交流抵抗を純粹の直流抵抗と比べると、表皮効果で10~23%、近接効果で3~6%の増加が見込まれる⁷⁾。

3.2 線路の低インダクタンス化

2本の直線状平行導体の自己インダクタンスを L_0 、導体間の相互インダクタンスを M とすると2本の導体の回路インダクタンス L は

$$L = 2(L_0 - M) \tag{1}$$

で与えられる。通常の線路では $L_0 > M$ であるが、多芯ケーブルでは配置条件により $L_0 \approx M$ となることがあり、線路のインダクタンスの局所的な大幅減少が可能となる。

2本の大きさを無視できる場合には

$$M = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left(\ell \ln \frac{2\ell}{R} - 1 \right) \tag{2}$$

で与えられる⁷⁾。ここに、 μ_0 は真空の透磁率、 ℓ は導体長であり、 R は導体間の幾何学的平均距離（GMD）を示す。導体間距離が10cmの4芯ケーブル、同軸線路、平行二導体線路を例にすれば、インダクタンスは大略0.3、0.4、0.8 μ H/mの順に増加すると試算されている⁸⁾。

3.3 大電流導体の発熱特性と電磁力

大電流導体の種類毎に検討すべきであるが、通常、送電線などでは中実導体が、屋内配線では平角導体が使用され、特に電磁力と低インダクタンスが問題化される場合には同軸母線が使用される。また、アーク炉や溶接機など電極の移動がある分野では可とう性の水

冷ケーブルが採用される。大電力線路では一般に抵抗体は損失を出すため有害であるが、過渡出力コイル用時定数の調整に高電圧・大電流用の抵抗器が必要となり、SUS（ステンレス）が使用される例がある。

これらの導体に関しては、連続許容電流、間欠性負荷電流に対して十分な発熱裕度、熱伸縮に伴う伸長および応力裕度、電磁力耐量が要請される。さらに、繰り返し通電に対しては導体材料の疲労特性も考慮する必要がある。具体的な電磁力対策として機器用に補強導体が付加される例があるが⁹⁾、線路では導体自体に十分な裕度を持たせることが一般的である。

4. 電力過渡制御機器

電力を個々の条件に応じて過渡的に制御するには、電力エネルギーを一時的に吸収または放出する機能が必要である。電力の輸送途中で、地絡・短絡故障や急激な負荷変動に伴う巨大な電流を抑制・平滑化する機能や、落雷や開閉に伴う異常な電圧を吸収する機能としては、制御用半導体、遮断器・限流器、電力用ヒューズ、アレスタなどが挙げられる。

4.1 制御用半導体²⁾

半導体電力制御素子は、他の機械的な制御機器に比べて、繰り返し寿命、信頼性、高速応答性が格段に優れており、電動機の変速制御や大電流高速制御分野などで、制御が高度化するにつれ、ますます重要度が増している。種類としても、従来のサイリスタに加えて、転流回路の不要な自己消弧機能を持つ素子が急速に発展しており、大電流化、高耐電圧化、高速制御化

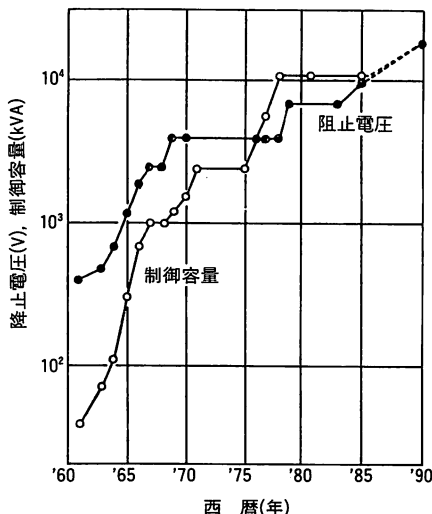


図-3 サイリスタ性能の進歩²⁾

が進んでいる。例として、図-3にサイリスタの制御容量および定格（阻止）電圧の年次別進歩を示す。

4.2 遮断器・限流器

短絡電流などの大電流を短時間に遮断または限流（抑制）する具体的制御機器としては、(1)半導体遮断器、(2)ガス遮断器、(3)高速形限流器などがある。

(1) 半導体遮断器

前節で述べた各種半導体を目的別に組み合わせる遮断器を構成する。電圧範囲としては直流で、電気化学用の数V級から、電気鉄道用の1kV級、直流送電用の100kV級まで直列接続技術の進歩が著しい。また、並列化に関しては、バラサやリアクトルを使用して電流分布の均一化を図り、塩水電界用には400kA級の制御まで成されている⁹⁾。

(2) ガス遮断器

交流高電圧系統の短絡電流を遮断制御するには、従来の空気吹付け式に代わり現在では、ほとんどの場合SF₆（六フッ化イオウ）ガスを吹付けるガス遮断器が採用されている。遮断能力としては63kA級を主流に、送電系統の容量に応じて各種定格のものが製作されている。

(3) 高速形限流器

配電系統では万一短絡故障が生じても、電子機器等を保護するため回路を完全に遮断するのではなく、故障電流を負荷電流クラスまで抑制することで回路を活

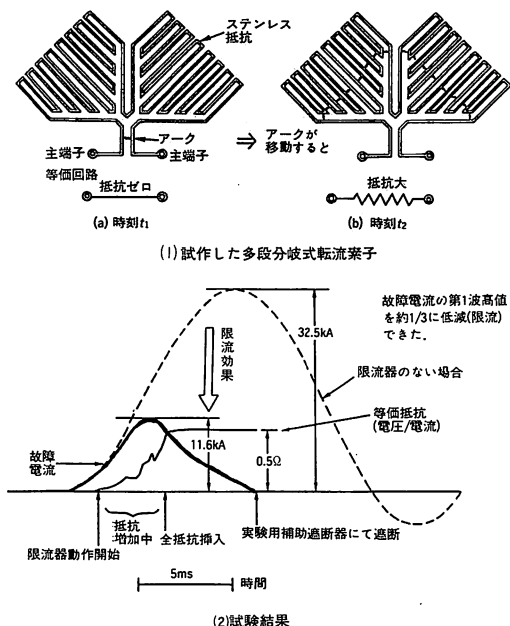


図-4 配電用限流器のモデル構成図

かす考えが最近挙げられている。このためには、負荷電流の10倍にも達する故障電流をせめて3倍以下に数msという短時間で低減させる限流器が必要とされる。既に、アークの走行を利用して回路に高速度で抵抗を挿入する方式などが開発中である¹⁰⁾。図-4にモデル構成図を示す。

4.3 電力用ヒューズ

遮断器より簡単に大電流を制御する機器として電力用ヒューズがある。特長としては他の保護機器に比べて、①小型・安価である。②動作が高速である。③遮断までに通過するエネルギー相当量 I^2t : (電流)² × (時間) が小さく、遮断性能が優れている。しかし、欠点もあり、①再投入ができない。②遮断不能領域がある。③繰り返し過電流によって劣化する。これらの欠点に対しては対策が講じられ、汎用の信頼性の高い大容量ヒューズシステムが提供されている。特殊なケースとしては、遮断 I^2t を変えずに通電容量を5kA級にまで増やすため、通電時の冷却を強化する方策として、外筒にフィンをつけたり、強制風水冷する方法や¹¹⁾、通電素子を筒状とし、素子内部を直接水冷した水冷パイプ式限流ヒューズも開発されている¹²⁾。図-5

にその原理図と直流30kAの並列遮断例を示す¹³⁾。また、劣化対策として、小容量ヒューズに大容量通電能力を持たすため、電気雷管により高速開極する遮断筒を接続した高速転流式限流ヒューズもある¹⁴⁾。特殊用途として、リアクトルに貯えられたエネルギーを高速で負荷へ転流する転流素子も考案され、1MAの電流で円筒状のアルミ箔の端子電圧を100kV級に上昇させ、エネルギーを負荷側に転流させている¹⁵⁾

4.4 アレスタ (避雷器)

系統において電力機器を雷サージ (過渡電圧) , 開閉サージから保護する機器として過電圧を吸収するアレスタが設置されている。従来は直列ギャップを有していたが最近ではギャップの無い酸化亜鉛 (ZnO) 形アレスタが主流である。アレスタは特定の電圧を越えた電圧が加わるとその超過電圧分だけを吸収するよう素子の電圧-電流特性が制御されており、大容量化に対しては、素子の直径を大きくすることや、並列接続を採用することで対策が講じられている¹⁶⁾。50個の素子を2並列接続し、1mA通電時の電圧 V_{1mA} のばらつきを1%以内に収めることで分流比を向上させた例が報告されており、実用的には84kVの定格電圧に対して35枚程度の素子が使用されている。

5. 電力の運転制御

パルス性の電力変化対応としては、トピック的ではあるが、超電導エネルギー貯蔵装置SMESを導入した負荷の平滑化、短絡故障発生時における限流器による健全相回路の電圧降下の抑制、無効電力の制御などが挙げられる。

5.1 超電導マグネットを用いた電圧抑制

急激な負荷変化により回路の電圧が変化した場合、回路電圧をある一定変化内に制御するには、回路途中で電気エネルギーの授受を行う必要がある。そのための一方策として、コイルが持つ電磁エネルギーに着目し、超電導コイルを作り莫大なエネルギーを電磁エネルギーとして貯蔵し、その一部を負荷制御に使用するSMES構想が検討されている。SMESは、都市近郊の電力用ケーブルを超電導化する構想と同じく、将来的には電力運用制御の要になることが期待されており、地震対策など、信頼性のある超電導システムの開発が待たれている。

5.2 故障電流の限流制御

短絡故障が発生すると、それより電源側に莫大な短絡電流が流れ、同一回線に連なる他の健全な回線まで

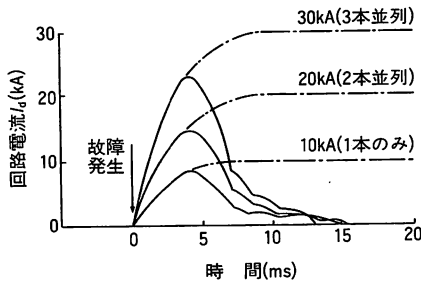
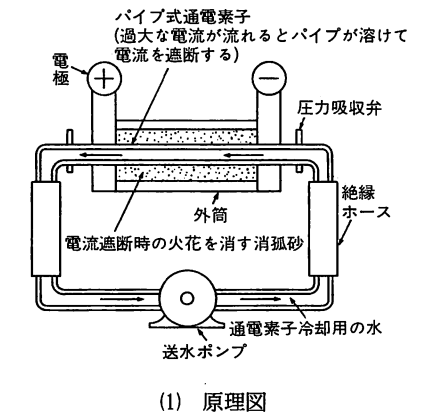


図-5 水冷パイプ式限流ヒューズの原理図と遮断波形

表1 短絡故障電流の抑制対策

対 策	内 容	問 題 点 等
系統電圧の格上げ	・高次電圧の導入により低次電圧系統を分断する	・高次電圧の導入範囲が用地面などから限定される
系 統 の 分 割	・系統を分割し高インピーダンスで連系する ・完全に分割する	・系統運用の柔軟性、信頼度、安定度が低下する
直 流 の 採 用	・交流系統を分割し、直流で連系 ・電源を直流を介して既設交流系統に持ち込む	・現状ではきわめて高価 ・直流機器などの実績信頼度面での検証が不十分
限 流 リ ア ク ト ル の 挿 入	・線路直列リアクトル ・母線分割リアクトル	・安定度の低下、過渡回復電圧などの面で検討を要する
高インピーダンス機器の採用	・より高いインピーダンスの発電機、変圧器を採用する	・安定度の低下、特殊設計によるコスト増を招く
系統構成面での対処	・1変電所への送電線導入ルート数を制限する	・里側変電所を増す必要あり
限 流 装 置	・常時は零あるいは零近くのインピーダンス ・事故時のみ高インピーダンス	・本節で詳しく述べている

8割以上もの大幅な電圧降下をひき起こす場合があり、変電所で遮断器が動作すれば、そこから出る全回線が全停となってしまう。これらの欠点を補い、さらに、遮断器の遮断責務を軽くする利点も含めて、各種の短絡故障電流の抑制対策が考えられており、それらを表1に示す²⁾。このうち、故障時だけ動作し、過大な故障電流を限流する限流器は、電力系統の連系効果を損なわずに電力機器の更新や系統運用に対して柔軟性を与える可能性がある。交流回路における限流方式としては、LC（リアクトル-コンデンサ）共振形と抵抗挿入形が検討されている。限流器の設置により、故障回線のみを単独に限流できれば、他の健全回路は遮断されず、さらに回路電圧はほとんど低下せず¹⁷⁾、十分そのまま運用可能となり、情報高度化が進むなかで、限流機能のメリットはますます大きくなるものと予想される。

5.3 無効電力の制御

負荷の変動による回路の電圧変動は計算すると、有効分（回路抵抗×負荷変動中抵抗分）と無効分（回路リアクタンス×負荷変動中リアクタンス分）の和で表され、送電系統では後者が主となる場合が多い。このため電圧変動を抑制するには、回路の無効電力を制御することが重要であり、各種の無効電力補償装置が開発されている。原理的には、電力用コンデンサやリアクトルをサイリスタ半導体で制御する方式：SVC（Static Var Compensator）と、自励式電力変換装置を調相設備として用いる方式：SVG（Static Var Generator）に分けられ、1/2～1/4サイクル級の応答速度で制御可能である。

6. 電力の過渡解析技術

電力系統は発電機、送配電線の分布定数、接地網、変換器などを複合した回路であり、そこにアークなどの非線形要素が含まれる。このため、計算機なしで系統を解析するのは困難である。

6.1 シミュレーション手法

以前はTNAと呼ばれる実時間タイプの専用解析装置が用いられたが最近ではデジタル計算が進歩し、以下の手法が良く使用される。

(1)EMTP（電磁過渡解析）…米国のボンネビル電力庁を中心に開発された、連立方程式を解く方式の電力系統解析用汎用プログラムで、サージ解析や、発電機特性、サイリスタ過電圧の解析などに便利だが、プログラムが莫大で実行時間が多くなる。

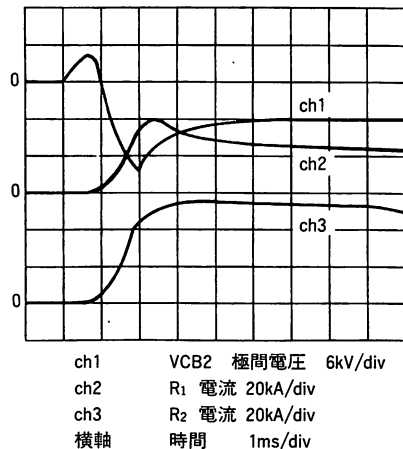


図-6 遮断時の電圧・電流波形

(2)ECAP (電子回路解析) …米国のIBM社で開発されたノード (節点) 分岐方式の電子回路解析プログラムで, 比較的小規模な周波数応答, 過渡応答の計算に適している。ただし, 非線形同志の並列化には配慮が必要である。

(3)ASTAP (改良形統計解析) …同じくIBM社の開発によるもので, 非線形回路の過渡解析がFORTRAN形式で可能である。

(4)用途によりSPICEやマイクロキャップⅢなども使用される³⁾。

6.2 シミュレーション例

巨大な電力を磁気エネルギーの形でコイルに貯え, 直流遮断器でコイル電流を遮断する過渡現象実測例を図-6に示す。本例はJT-60形プラズマ試験装置の電源用で, 遮断電流は92kA, 転流周波数は1kHzと高く, ASTAPを用いて解析された。直流遮断部には転流式の真空遮断器 (VCB) が採用されているが, 解析例と実測波形とは良く一致する成果が得られている¹⁰⁾。

7. 電力測定システム³⁾

過渡大電流の測定には, ノイズの入らないように接地, シールド系を十分に施すことが大切である。特に雑音対策として, ①測定ケーブルシースに分流する電流によるケーブル心線への誘導, ②大電流回路より発生する電磁界, ③電源より測定器に侵入する高周波雑音などに対する工夫が必要とされ, 良好な接地, リード線の短縮, 二重シールドの採用, シールド変圧器の挿入などが実施されている。

電流測定用には主としてms応答には直線形又は折返形の分流器, 変流器が使用され, μ s級の高速応答が要求される場合には同軸形分流器, 高周波変流器, ログスキーコイルなどが使用される。最近では, 高電圧用やノイズ対策用に光伝送技術を利用した光変流器も開発されている。この方式は, 従来の電気出力を光出力に変換する光変換応用方式と, 磁界の強さに比例して変化する偏光子の偏光角を利用する磁気光学効果応用方式に大別され, それぞれ特徴ある方式が考案されている。

8. むすび

以上, パルスパワーに関連した過渡的電力制御として, ms級の時間応答に関連する現象を, 電力回路および電力エネルギー, ひいては大電流現象という観点から取り上げてみた。純粋な電力系統論としては, 最

近FACTS (フレキシブル交流送電システム) という構想が米国EPRI電力研究所から発表されている¹⁰⁾。この方式は, シリコン技術を送電線に適用し, 瞬時々の電力潮流を最小の損失となる系統を選択して送電しようとするもので, 将来的に, ハード面で, 緊急負荷制御装置, 大エネルギー避雷器, サイリスタ遮断器, 電力位相調整装置, 故障電流制限装置, 静止形無効電力補償装置, モジュール式直列コンデンサ・リアクトル等の開発を必要とし, 本稿で取り上げた項目がほとんど対応している。このようにパルス性電力制御は実用面とも, また, プラズマ核融合など今後の試験分野とも関係が深く, ますますの技術発展が期待されている。なお, 本稿を作成するにあたり, 筆者も参画の機会を得た参考文献(1)~(3)を主として参照させていただいた。関係者に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 原田達哉ほか; 大電流技術の現状と展望, 電気学会・技術報告 (Ⅱ部) 第228号 (1986)。
- 2) 原田達哉ほか; 大電流制御技術の現状と動向, 電気学会・技術報告 (Ⅱ部) 第292号 (1989)。
- 3) 原田達哉ほか; 大電流工学ハンドブック (1992), コロナ社。
- 4) 村井 裕ほか; 2) P.4または交流大電流の発生技術, 電気学会・高電圧研究会資料 HV-81-47 (1981)。
- 5) T. Matsukawa et al.; 2) P.10またはConstruction of Power Supply System for Toroidal Field Coil of Large Fusion Experimental Facilities JT-60, Fusion Engineering (1985)。
- 6) R. E. Stillwagonn & P.Thullenn; 2) P.12またはProc. 7th Symp. on Eng. Problems of Fusion Research, 439 (1977)。
- 7) 竹山; 電磁気学現象理論, XV, 丸善。
- 8) 三木ほか; 米国防核融合装置, 2) P.33
- 9) 田中ほか; 三菱電機技報, Vol.51, No.11, P.761 (1977)
- 10) 岡崎正幸, 関口輝一; 新しい配電用限流器の開発状況, 電気学会論文誌, 110-B, P.701 (平成2-9)
- 11) 鈴木; 昭和61年電気学会連合大会, 1-101
- 12) 稲葉次紀; 電気学会論文誌, 99-B, P.125 (昭54)
- 13) T. Inaba; Trans. IEEE, PAS-103, No. 7, P.1888 (1984-7)
- 14) 三好ほか; 昭和44年電気学会東京支部大会
- 15) 上野 勲ほか; 電気学会論文誌, 99-B, P.721 (昭54)
- 16) 西脇ほか; 酸化亜鉛形避雷器の並列接続による重責務化, 電気学会論文誌, 102-B, P.320 (昭57)
- 17) 岡崎正幸; 配電線事故電流を低減, 新電気, 第44巻5号, P.11 (1990-5)
- 18) 嶋田隆一ほか; JT-60核融合電源システム, 昭和52年電気学会全国大会, S. 7-6
- 19) 広瀬 胖; フレキシブル交流送電システム: FACTS, IERE海外情報 No.9003 (平成2年)