

電力分野の規制緩和が進み、発電から電力消費のすべての箇所で、独自に経済性を追求したシステムがこれから求められてくる。その一方で、環境問題や供給信頼度の維持向上といった要求も高まると考えられる。

これらの要求を満たす技術としてパワーエレクトロニクス(PE)技術が利用できる。当社も、直流送電や SVC(Static Var Compensator)といった、従来から電力システムに適用されている PE 技術に加えて、自己消弧型素子の性能向上により、更に高機能な PE 技術応用装置を数多く開発した。これらの PE 技術を、今後、更に発展させ、大きく変化していくと思われる電力システムへの適用拡大を図っていく。

With the progress of deregulation in the electric power field, more economical systems are being demanded in all areas from power generation to power consumption. On the other hand, demand related to environmental issues and to the maintenance and improvement of supply reliability is also expected to continue increasing.

Power electronics (PE) technologies can be used to satisfy these demands. In addition to developing PE technologies that have long been applied to electric power systems, such as DC power transmission systems and static var compensators (SVCs), Toshiba has also been developing various equipment applying PE technologies with higher functionality by improving self-turn off type components. Further developing these technologies in the future, we plan to expand their application to electric power systems which are expected to undergo major changes from now on.

変わる電力需給

わが国においても電力自由化がスタートし、これまでの IPP(Independent Power Producer)による電力卸に加えて小売も可能となり、わが国の電力システムも大きく変わりつつある。現在の小売規模は、2 MW, 20 kV 受電以上とされているが、規制緩和の推進により、更に、小容量、低位系まで拡大されると想定される。これにより、従来とは異なる電力システムへと変貌(へんぼう)していくと考えられる。

ここでは、このような状況下において、将来予想される電力システムの姿、そして、そこに発生するであろう様々な課題と、それを解決する PE 技術について述べる。

将来の電力系統

電力系統の構成条件を見ると、コストの低減、二酸化炭素(CO₂)などの

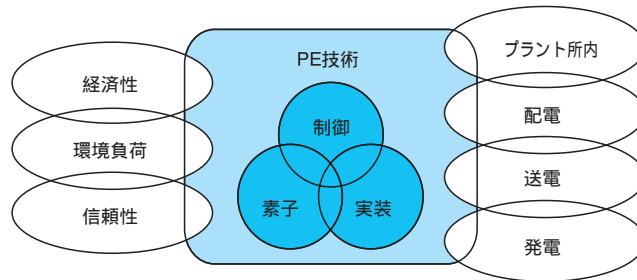


図1. PE 技術とその関連領域 PE 技術が電力分野の今後の課題を解決する。
PE technologies and applications

環境問題、電源の立地難などの制約を受けながら、ますます競争原理の導入が促進されており、電力系統は次のように評価されている。

- (1) 資本費と運用費の合計である経済性による評価。そこでは、設備利用率や高効率運転が求められる。
- (2) ライフサイクル温室効果ガス排出量(LCCO₂)などによる環境負荷面からの評価。
- (3) 供給の継続性や周波数・電圧

の変動抑制などの信頼性による評価。

そして、電力供給者も消費者も独自に評価比較して、それぞれの方策をとっていく(図1)。

このような状況の下に、今後の電力系統の基本的構成を考えると次のようになるとと思われる。

理想の系統構成は、需要と供給がバランスした小系統を積み上げた形と考える。電力消費が始まったころは、まさしくその形であった。しかし、

需要密集地では、現在と同じく他系統からも受電する構成となる。

事故が発生して系統の一部が解列して、その影響で連系統全体が崩壊するような場合は、各小系統ごとに切り離して独立運転するのが理想である。そのために、常時の潮流をこれまで以上に積極的に制御したり、事故を監視して系統分離する装置や、系統内の需給バランスを保つ装置や制御が必要となる。そこにPE装置が大きな役割を果たすと考えられる。

PE 素子と変換器

現在の電力系統用のPE機器に使われている主な素子は、光サイリスタ、GTO(Gate Turn-Off thyristor)であり、今後 IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)がGTOに代わり使われていくと考えられる⁽¹⁾。

変換器技術としては、素子の特性を十分把握し、絶縁技術、熱処理技術、冷却技術、高速な制御技術、保護技術の組合せが要求される。

これまでの当社の実績を表1に示す。高電圧大容量変換器としては、サイリスタを用いた他励式が採用されており、コスト、損失、信頼性の観点から今後も使われていくであろう。

STATCOM(STATic synchronous COMPensator)に適用されるGTO、あるいはIEGTを用いた自励式変換器は、容量が次第に大きくなってきており、現在300 MVA級まで作る技術を確立した。更に大きな容量には、基本となるユニットを積み重ねて実現する方向と想定される。また、

他励式の適用が比較的難しい系統から適用されていくであろう。

基幹系統における PE

既存送電線の効率化

既存の送電線を増設せずに、これまで以上に多くの潮流を送る送電線の高效率運用が求められる。そこには、いわゆるFACTS(Flexible AC Transmission Systems)機器の適用が考えられる⁽²⁾。

図2に示す例は、1台の発電機から無限大母線へ2回線の150 km送電線で電力を送っている状態で、地絡事故があり、その送電線が解列して1回線が残る条件である。FACTS機器を適用しない場合、脱調(同期外れ)せずに過渡安定度が維持できる送電限界は3,700 MWである。この送電線は500 kVのTACSR(Thermoresistance Aluminum Cable Steel Reinforced)810 mm² × 4条を想定しており、送電線自体の熱容量限界は6,600 MW程度あるので、更に多くの

潮流を送る手段を検討する。送電容量を4,500 MWに上げるために必要なFACTS機器の容量を計算すると、表2ようになる。

ここで、TCBRはサイリスタ制御制動抵抗(Thyristor Controlled Braking Resistor)であり、サイリスタで抵抗器の導通時間を最適に制御するもので、発電機端に設置して発電機の事故中の加速エネルギーを吸収し、系統を安定化させる役割を持つ。機械式開閉器による制動抵抗と異なり、高速で、かつ開閉数の制約がない。

TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)は、図3に示すように直列コンデンサに並列に、リアクトルとサイリスタを接続して、コンデンサによる送電線の補償度をサイリスタで連続制御する方式である。

STATCOMは自励式SVCとも呼ばれ、図4の一部に示すように、直流(DC)側にコンデンサを接続した自励式変換器で、交流(AC)系統へ無効電力を供給して系統の電圧を制御

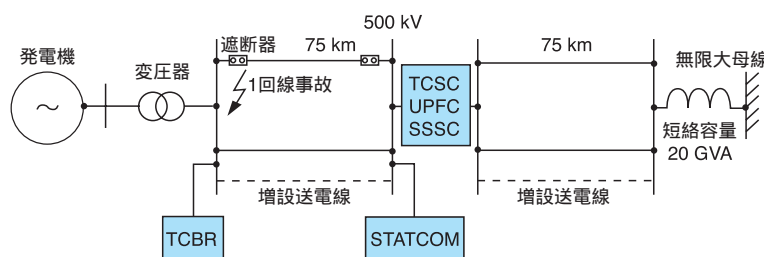


図2．安定度解析系統 事故後の電力系統をFACTS機器で安定化することができる。
Power system configuration for stability study

表2．系統安定化に必要なFACTS装置の容量比較

Comparison of capacities of FACTS equipment for power system stabilization

| 適用するFACTS | 必要容量 |
|-----------|-----------------------|
| 対策なし | (第1波脱調) |
| 送電線ルート増設 | 150 km |
| TCBR | 800 MW |
| STATCOM | 900 MVA |
| TCSC | 430 MVA(直列コンデンサ30%補償) |
| UPFC | 1,100 MVA |
| SSSC | 900 MVA |

表1．変換器と製作実績容量

Largest converter capacity applied to power systems

| 適用例 | 変換器定格 |
|---------|---------|
| HVDC | 700 MW |
| 周波数変換器 | 300 MW |
| 他励式SVC | 300 MVA |
| STATCOM | 53 MVA |

し、安定度を向上させる⁽³⁾。

UPFC(Unified Power Flow Controller)は図4に示すように、自励式変換器1は、STATCOMとして系統に無効電力を供給し、自励式変換器2は直列変圧器を介して直列に電圧を送電線に供給して、等価的に送電線のインピーダンス又は電圧の位相を可変にして安定度を向上させる。

SSSC(Static Synchronous Series Compensator)は、図4の一部に示すように、UPFCの自励式変換器2側の構成部分を独立させたもので、送電線のインピーダンスを容量性方向にも誘導性方向にも補償できる。

表2は、系統を安定化するのに必要なFACTSの容量を示しているが、この容量にそれぞれの建設単価を掛け合わせれば建設コストがわかる。いずれにしても、送電線をもう1ルート建設するよりは安いコストで実現で

きる。ただし、ここでは図1の例で比較したもので、系統の構成や条件により必要な容量は変わり、表2の容量比が常に成り立つわけではない。例えば、TCBRは発電機端に置くのが効果的で、設置場所が異なれば、必要容量が増加することは容易に推測できる。また、これらFACTS機器の組合せによる最適化も考えられる。

■長距離 HVDC

基幹系統の中で、発電地帯から需要地へ正確な潮流制御をしながら電力を送電する場合には、HVDC (High Voltage Direct Current)が最適である⁽⁴⁾。また、送電ルートにケーブルが存在し、その区間が30 ~ 40 kmを超える場合には、AC送電ではケーブルの対地静電容量のため無効電力が大きくなる。この場合もHVDCが有効であり、その代表例が紀伊水道HVDCである。

諸外国で進められている国際連系に関しても、やはり正確な潮流制御ができ、かつ、両側のAC系統を非同期で連系できるHVDCが適している。

■都市型 HVDC と離島への送電

都市部で電力需要が増加すると、立地条件により送電ルートは増設できないが、送電電力は増加しなければならない。都市部ではACケーブルが使われており、より高耐圧のAC

ケーブルにすることで、送電電力を増加することも可能であるが、DCにして送ることも一つの解である。DCにすればケーブルによる無効電力の問題はなくなり、かつ、受電側を自励式変換器にすれば、複数地点でACに変換できる多端子構成が容易となる。

離島においても、海底ケーブルによるHVDCで送電することで、従来からのディーゼル発電機に代わり、保守が簡便で低コストの電力供給を可能にすることができる。

■フライホイール発電装置

これは一種の誘導機である二重給電交流機(可変速機)にフライホイールを付け、系統からのエネルギーをはずみ車に蓄え、その回転速度を変えてエネルギーを充放電する装置であり、すでに実用化されている⁽⁵⁾。速度変動の幅に合わせた容量の変換器で、回転速度を制御して有効電力を充放電できるだけでなく、発生電圧も高速に制御できるので、系統の周波数維持と電圧維持の双方に有効である。電力の蓄積装置としても使えるので、今後の適用拡大が期待できる。

■可変速誘導周波数変換装置

周波数変換装置として、サイリスタを用いた静止形の大容量の設備として、国内では、佐久間周波数変換所、新信濃周波数変換所などがある。100 MW程度以下の比較的中小容量の場合には、二重給電交流機とPE技術を組み合わせた回転機型の50 Hz - 60 Hz周波数変換装置の適用も考えられる⁽⁶⁾。

概要を図5に示す。

主機である誘導周波数変換機の固定子と回転子を両系統に接続し、両周波数の差であるスリップ分をAC励磁駆動電動機から供給する。これも可変速技術を適用したものであり、AC励磁駆動電動機のトルク制御に自励式変換器を採用しているが、変換器容量は定格の数%で十分である。

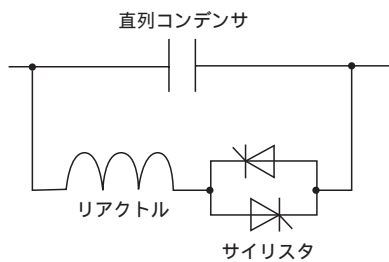


図3 . TCSC回路 TCSCは、リアクトルを流れる電流をサイリスタで制御して、直列コンデンサの等価キャパシタンスを調整する。

TCSC circuit diagram

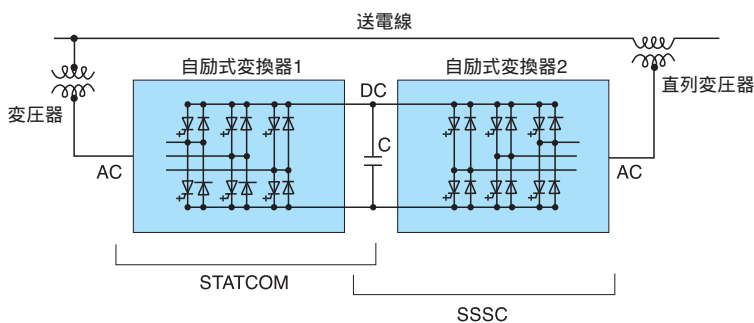


図4 . UPFC回路 UPFCは、STATCOM部分で系統に無効電力を供給し、SSSC部分で送電線の電圧低下を補償する直列電圧を供給する。

UPFC circuit diagram

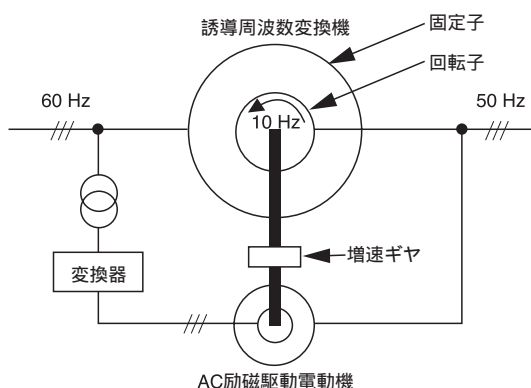


図5．可変速誘導周波数変換装置 交流可変速技術とPE技術の組合せにより、損失の少ない回転機型の周波数変換装置を製作可能にした。
Adjustable-speed induction frequency converter

エネルギーは蓄えられないが、周波数変換しながら潮流制御ができ、電圧的には通常の変圧器と同等な特性となる。

配電系統における PE

配電系統は今後、規制緩和につれて分散電源が増加していく。将来的には負荷が要求する信頼度に応じた配電構成が作られていくであろう。高信頼負荷に対しては、分散電源や電力貯蔵装置により、部分的に発電と需要をバランスさせて、上位系統での事故時にも、単独系統に切り換えて運転の継続を可能にする。そのために、高速で入り切りできる半導体スイッチなどが採用される。

また、分散電源ではAC側はインバータを介して系統と接続するものが多く、分散電源が増えると、インバータによる波形歪(ひずみ)の問題が現れる。それに対してはアクティブフィルタ⁽⁷⁾も対策の一つである。

分散電源として風力発電を用いる場合は、その総容量が多くなると、系統の電圧変動が大きくなる問題が発生する。風力発電装置は誘導機が用いられるので、系統から消費する無効電力が大きく、しかも風の状態により変動するので、系統の電圧も変動する。その場合はSVCやSTAT-

COMにより解決することができる。

プラント内での活用

規制緩和につれて、工場や大型プラントでは自家発電装置の設置により、買電との組合せにより全体のエネルギー消費の削減、CO₂削減を可能にする。そればかりでなく、自家発電で賄える場合は、系統で事故が発生している間、系統とプラント所内の系統を切り離し、単独で運転することも可能である。その場合は、高速サイリスタ型開閉装置を採用して、プラント内の系統を信頼性高く運転することが可能となる。

今後の課題と展望

半導体デバイス

PEでは、半導体デバイスを、オンかオフのいずれかの状態を使い分けて電力を制御する。変換に伴う損失を最小にするには、オン時の半導体デバイスでの電圧降下であるオン電圧は、限りなくゼロ(0)に近いことが望まれる。また、オフ時の耐圧能力は限りなく高く、電圧上昇率を抑制するダンピング回路などの保護回路を必要としないことが望ましい。更に、オンからオフ、オフからオンへの時間が限りなく短く、高周波スイッチングが可

能であることが、制御の自由度を高めるために求められる。

現在のシリコン(Si)を材料とした半導体も、大幅に特性が改善されてきてはいるが、残念ながら前述の理想を達成してはいない。今後、更にPE装置の適応を拡大するためには、半導体デバイスの更なる改善が望まれる(囲み記事参照)。

その一つの動きとして、Siと炭素(C)の化合物であるSiC(炭化けい素、シリコンカーバイド)がSiに代わる材料として注目され、開発が進められている。SiCは絶縁破壊電界がSiの約10倍高い。すなわち、同じ耐圧ではSiCデバイスはSiデバイスの1/10の厚みでよく、オン電圧が大幅に低下する。これまで、高速だが、高耐圧化すると急激にオン電圧が高くなるため、大電力への適用が困難であったFET(Field Effect Transistor)の欠点だが、SiCの適用により大幅に改善される。電子及び正孔といった電気を運ぶキャリアの動きやすさを示す移動度も高くなるため、オン電圧は1/10以下となる。また、SiCはSiに比較して熱伝導率が約3倍高い。Siデバイスは125℃以下で使用するように冷却設計をする必要があるが、SiCではSiの3倍程度の高温動作が可能であり、変換器の冷却が簡素化できる。

このように、SiCデバイスは、Siデバイスに比較して、高耐圧で低損失、かつ、高速スイッチング化が容易であること、また、高温での使用が可能であることが期待され、低損失で、小型の変換器が可能となる。SiCデバイスは、現在は欠陥の少ないSiCの結晶を製造することが、最大の課題となっているが、10年後には実用化が進展しているものと想定される。

実装技術・要素部品の開発

半導体デバイスの特性が理想に近づけば近づくほど、変換器の実装技術が重要となってくる。例えば、電流を高速に遮断すると、主回路の浮遊

PEの発展を支える 半導体デバイスの進歩

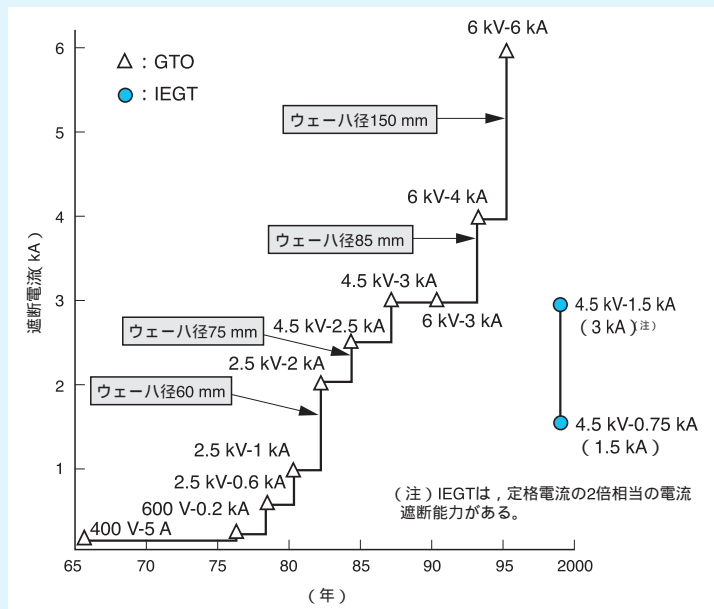
直流送電は、1954年に水銀整流器によって実用化され、70年にサイリスタによる変換器が実用化されて以降、適用例が急速に拡大した。当社が佐久間サイリスタ変換装置試験所で37.5 MWのサイリスタ変換器をフィールド試験したのも70年であり、このときのサイリスタ定格は2.5 kV-0.5 kAであった。その後も、サイリスタは、高電圧大容量化とともにゲートの光トリガ化などの改良が加えられ、信頼度の高い変換器技術確立に貢献している。今年の6月に運転を開始した紀伊水道直流送電(1,400 MW)では、8 kV-3.5 kAの光トリガサイリスタが適用されている。

みずからの信号で電流を遮断できる能力を持つ自己消弧型の半導体デバイスの開発も目覚ましいものがある。GTOは、大口径で均一なウェーハが開発されたこと、均一性の優れたプロセス技術が開発されたことなどにより、80年代に急速に大容量化が進んだ。90年代に入り、自励式静止形無効電

力補償装置を中心に、電力系統へ適用され始め、自励式変換器の高機能性が検証されている。

当社は、電圧でゲートを制御でき、GTOに比較して高速スイッチが可能なIEGTを4.5 kV、1.5 kA(遮断電流は3 kA)まで開発している。6 kV級

以上の定格のものも開発中であり、GTO以上の速さで大容量化が進みつつあり、今後、ますます多様化する電力系統のニーズにこたえる、様々なパワーエレクトロニクス装置の開発と適用促進に貢献できるものと思われる。



自己消弧型半導体デバイスの大容量化の変遷

のインダクタンスを低減しないと、遮断後の過電圧が厳しくなる。また、SiCデバイスによる高耐圧デバイスが開発されたとしても、その成果を小型化に結び付けるには、半導体デバイスの外側の絶縁距離を短くする新たな技術が必要となる。半導体デバイスと一緒に適用される要素部品に関しても、例えば、高温で使用できる付属部品の開発をしなければ、高温で使用できるSiCデバイスの性能を生かし切れないことになる。

また、例えば20 kHz以上のスイッチングを行うと、人間の耳では騒音が聞こえなくなると言われているが、大電流を高周波でスイッチングすると、誘導加熱の問題もあり、対策に求められるバーは高くなる。

■EMI (ElectroMagnetic Interference)

PE装置は、必ずしも電力系統に恩恵だけをもたらすものではない。PE装置の副作用として、EMIが挙げられる。電圧や電流を切り刻むため、どうしても高調波が発生する。発生した高調波をそのまま系統に流出させると、電話障害や、一般のAC機器の加熱といった問題を引き起こす。したがって、高調波フィルタを設置して系統への流出を防ぐとともに、高調波の発生そのものを、回路の工夫により低減する対策が必要となる。逆に、PE技術により、系統の高調波をキャンセルさせようとするものが、アクティブフィルタであり、PE装置によって発生する問題を、PE装置によっ

て解決する例である。

高調波のように伝導性のEMIのほかに、ラジオノイズのような放射性のEMIもある。半導体デバイスの進歩に伴って、高耐圧で、高速に、大電流を切り刻むようになると、この問題は今後、ますます注目されることになると思われる。高調波と同じように、変換器自体からの発生を低減する工夫をするとともに、的確なシールド対策も配慮する必要がある。

■半導体による開閉器

PEの究極の応用製品は、半導体開閉器と思われる。現在は通電損失、及び経済性の観点から、機械式開閉器によって、送電線や電力機器は互いに接続され、事故が発生した場合

には事故部分だけが切り離される。しかし、機械式であるために、応答速度は制約がある。例えば、送電線の事故時も、高速に事故区間だけが除去できれば、安定度は向上し、常時送電できる電力も高まる。

サイリスタなどの自己消弧能力を持たない素子によっても、半サイクルで事故除去できる。自己消弧型の素子による開閉器では、事故電流がピークに達する前に遮断することも可能である。もちろん、それに応じて事故検出も速く行えなければならないが、電力品質を論じる際に問題となる瞬停(瞬時停電)も、このような半導体開閉器により大幅に改善されるものと思われる。そのためには、ここで取り上げた課題が、かなりのレベルで改善される必要があるが、PEに携わる者の立場からは、早くその時代を迎えたいと考えている。

今後の展望

電力システムの将来とそこに現れるであろう課題、それを解決する技術、装

置を現在の技術をベースに述べた。そしてPE技術が問題解決に有効であり、最適化の一つの手段である見通しを明らかにした。PEは、ここでは割愛した産業用への適用との技術面での相乗効果により、更に発展すると考えられる。

文献

- (1) 松田秀雄 . IEGTの開発状況 - 電子注入促進形トランジスタ . 電気学会誌 . 118 , 5 , 1998 , p. 278 - 281.
- (2) 色川彰一 . 系統安定化装置-FACTS . 電気評論 . 1998 , p. 58 - 63.
- (3) 常磐幸生 ,ほか . 電力系統用自励式 SVC の開発 . 電気学会論文誌 B-113 , 2 , 1993 , p. 168 - 176.
- (4) Dusan Povh. "Use of HVDC and FACTS". Proc. of the IEEE. 88, 2, 2000-02, p. 234 - 245.
- (5) Nohara, T., et al. "Successful commercial operation of doubly-fed adjustable speed flywheel generating system". CIGRE/IEEJ. Joint colloquium, 1997-10.
- (6) スレシ チャンドラ パルマ ,ほか . 可変速誘導周波数変換装置の検討 . 電気学会 . H12 全国大会 , 6 , 177 , 2000 , p.2085.
- (7) 小坂葉子 ,ほか . 高調波吸収装置の検証試験 . 電気学会 . B 部門大会 , 307 . 1997 , p.411 - 412 .



横田 岳志
YOKOTA Takeshi

電力システム社 電力事業部 電力変電技術部部长。
変電システム・機器の開発に従事。
電気学会、IEEE 会員、CIGRE SC23 委員。
Transmission, Distribution & Hydraulic Power Systems & Services Div.



小林 淳男
KOBAYASHI Sumio, D. Eng.

情報・社会システム社 府中情報・社会システム工場 技監, 工博。
電力変換装置の開発・設計に従事。
電気学会会員, IEEE FELLOW。
Fuchu Operations - Information and Industrial Systems & Services



荒井 純一
ARAI Junichi, D. Eng.

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 技監, 工博。
電力系統の研究・開発に従事。
電気学会会員, IEEE Senior Member。
Power and Industrial Systems Research and Development Center