

パワーエレクトロニクス機器の電磁ノイズシミュレーション技術

Electromagnetic Noise Simulation Technology for Power Electronics Equipment

玉手 道雄 TAMATE, Michio

林 美和子 HAYASHI, Miwako

市瀬 彩子 ICHINOSE, Ayako

省エネルギーや創エネルギーの核となる製品としてパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器が広く利用されている。しかし、パワエレ機器は通信障害や電子機器の誤動作や破損などの電磁ノイズ障害を引き起こす恐れがある。富士電機は、伝導ノイズや放射ノイズによる電磁ノイズ障害を防ぐために、シミュレーションを用いたさまざまな技術開発に取り組んでいる。発生する電磁ノイズを机上で再現することにより、解析モデルの使い分けによる製品開発への適用、規制を満足するための高精度化の検討、パワエレシステムへの適用など、シミュレーションを幅広く活用している。

Power electronics have been becoming more widely used as core products for achieving energy savings and energy creation. However, power electronics equipment may cause electromagnetic noise interference, such as communication failure and malfunction and damage of electronic equipment. For preventing electromagnetic noise interference caused by conduction noise and radiation noise, Fuji Electric has been developing various simulation-based technologies, including the improvement of the analysis accuracy of electromagnetic noise generated by power electronics equipment to comply with relevant regulations, analysis models from which we can select a simplified or detailed one depending on applications, and applications for power electronics systems in addition to that for single equipment.

1 まえがき

エネルギーを効率良く使う省エネルギー（省エネ）や、太陽光発電、風力発電などの創エネルギー（創エネ）において、核となる製品として広く利用されているのがパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器である。パワエレ機器は、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）、MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）といったパワー半導体の高速スイッチングにより、電気を使いやすい形に自由に変換できるため、さまざまな場面で活躍している。近年は、SiC（炭化けい素）やGaN（窒化ガリウム）を使用した次世代パワー半導体の量産が始まっており、さらなる低損失化により、効率改善や装置の小型化に向けた技術開発が盛んに行われている。

非常に便利なパワエレ機器ではあるが、動作時にノイズとなる電流や電磁波を周囲に放出し、通信障害や電子機器の誤動作や破損などの電磁ノイズ障害を引き起こす恐れがある。これらの電磁ノイズ障害を防ぐため、パワエレ機器には、周囲に放出する電磁ノイズが十分に低減されていることが求められる。パワエレ機器の損失を減らすためにスイッチングを速くすると、周囲に放出する電磁ノイズのエネルギーが大きくなるため、装置内に電磁ノイズを閉じ込めて周囲の環境を守る技術の開発が必要となってくる。

富士電機では、パワエレ機器に起因する電磁ノイズ障害を防止するためにシミュレーション技術を活用している。

2 電磁ノイズシミュレーション

近年、多くのメーカーがパワエレ機器の電磁ノイズシミュレーションに取り組んでおり、その成果が種々報告されている⁽¹⁾。富士電機では、いち早くパワエレ機器の電磁ノイズシミュレーション

の技術開発に取り組み、製品への適用を進めてきた⁽²⁾。

2.1 パワエレ機器に求められるノイズ低減

図1に、パワエレ機器が発生する電磁ノイズの模式図を示す。パワエレ機器は、パワー半導体の高速スイッチング（数kHz～数百kHz）により、入出力のケーブルを伝わって外部へ流出すれば伝導ノイズとして、各所から電波として放出されれば放射ノイズとして、大きな電磁ノイズを発生する。

これらの電磁ノイズによる障害を防止するため、パワエレ機器を含む電気機器にはさまざまな規制に基づき電磁ノイズを低減することが求められている。特に、1996年から欧州（EU域内）でEMC指令^(注)によりCEマークの付与が義務付けられたことをきっかけに、さまざまな電磁ノイズ低減手法が提案されてきている。しかしながら、パワエレ機器においては、発生する電磁ノイズの低減と性能向上（損失低減）はトレードオフの関係にあるため、製品開発のたびに試行錯誤を繰り返して電磁ノ

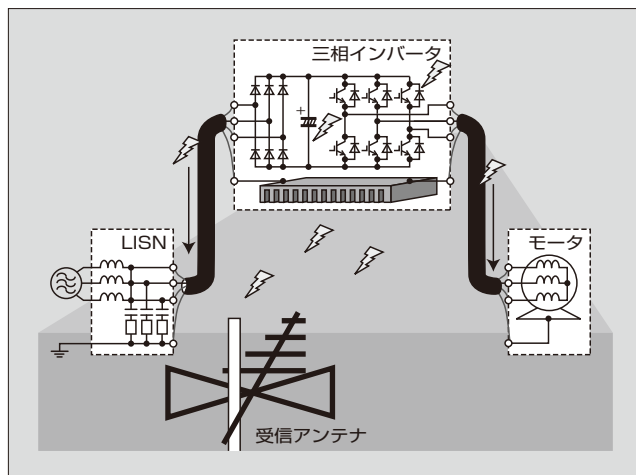


図1 パワエレ機器が発生する電磁ノイズの模式図

イズ対策をしなければならず、多くの時間と労力を費やしている。

富士電機では、試行錯誤を行うことなく EMC 指令に適合することを目的として、パワエレ機器の電磁ノイズシミュレーションの技術開発を始めた。

2.2 伝導ノイズのシミュレーション

EMC 指令に適合するためには、ケーブルを伝わり外部へ流出する伝導ノイズの大きさ（レベル）を、システムを模擬する疑似電源回路網（LISN：Line Impedance Stabilization Network）に到達したノイズ電圧（雑音端子電圧）として 150 kHz ～ 30 MHz にわたって測定・評価を行い、全ての相を規制値以下に低減しなければならない。

規制対象であるパワエレ機器の雑音端子電圧を導出する伝導ノイズシミュレーションを図 2 に示す。伝導ノイズシミュレーションは、図 2 (a)に示すように、①装置のインピーダンスを再現する詳細な装置のモデル化、②回路動作を模擬した回路解析、③回路解析結果のデータ処理、の三段階に大きく分けられる。装置のモデル化においては、インピーダンスを測定できる回路部品では測定結果に基づいて LCR の回路素子を組み合わせ

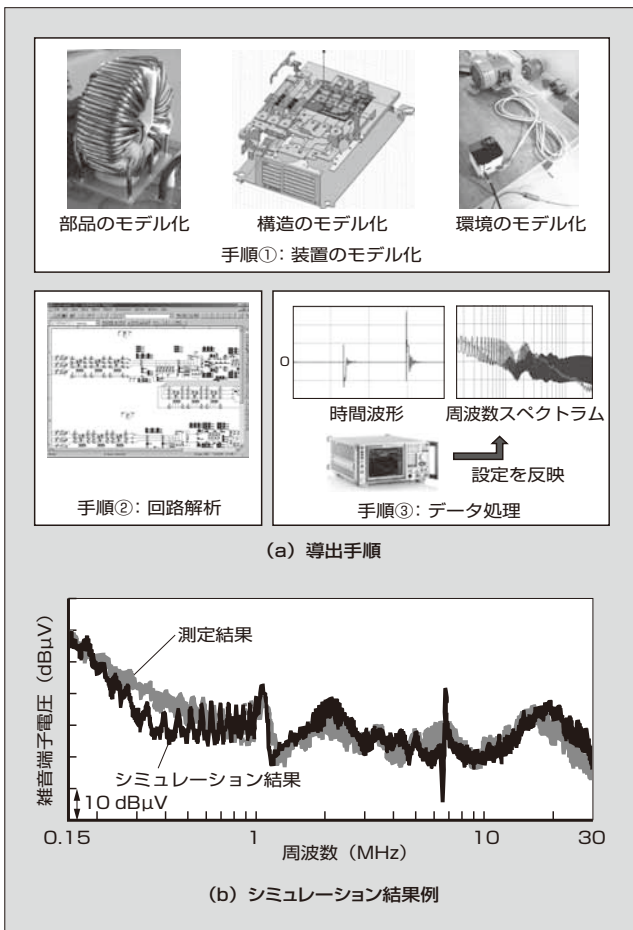


図 2 伝導ノイズシミュレーション

〈注〉 EMC 指令：CE マークを付与するために適合しなければならない技術的要求項目の一つで、電磁両立性（EMC）に関する要求をいう。

せ、測定が困難なプリント板や構造部品では電磁界解析を用い、等価回路モデルを構築する。また、入出力ケーブルなどは測定時の長さや配置の影響も回路解析に反映する。さらに、回路解析によって得られた結果と雑音端子電圧として測定された結果を一致させるためには、時間波形から周波数スペクトラムへの変換の際に、スペクトラムアナライザの帯域幅などを再現するデータ処理が必要となる。

雑音端子電圧の推定精度は、装置のモデル化を詳細に行うほど向上し、最も複雑なモデルを構築した条件では、図 2 (b)に示すように雑音端子電圧で規制される 150 kHz ～ 30 MHz の全領域でほぼ一致した結果が得られている。

2.3 放射ノイズのシミュレーション

放射ノイズの大きさ（レベル）は、パワエレ機器から 10 m 離れた場所に配置した受信アンテナにより、放射電界強度として測定する。このとき、パワエレ機器を 360 度回転させるとともに、受信アンテナの高さや角度（水平、垂直）を変化させたときの最大値を規制値以下に低減しなければならない。

放射ノイズのシミュレーションは、伝導ノイズに比べて非常に難易度が高い。図 1 に示したように、伝導ノイズが LISN に到達した電圧のみで評価されるのに対し、放射ノイズは装置に意図せず形成される無数の放射源から空間へ放射されるためである。図 3 に、富士電機で取り組んでいる放射ノイズの測定例とシミュレーションを示す。ここでは伝導ノイズシミュレーションとの相違点を中心に述べる。

パワエレ機器のスイッチング周波数に比べ、放射ノイズの評価周波数が 30 ～ 300 MHz と高いため、この周波数成分を含むスイッチング波形を回路解析で正確に求めることは難しい。そこで、10 MHz 以上の電磁ノイズシミュレーションを行う場合には、図 3 (a)に示すような IGBT 周辺回路を模擬した状態で測定したスイッチング波形を回路解析に反映している。

次に、電磁波解析が必要となる。簡単な回路動作の場合に

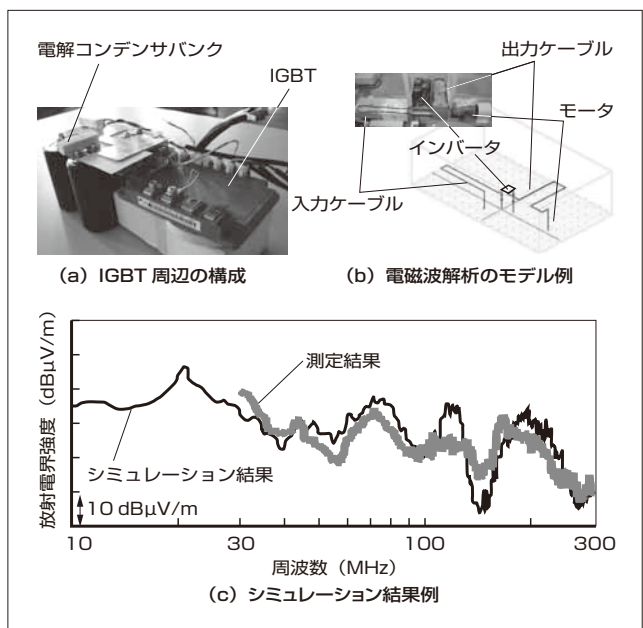


図 3 放射ノイズシミュレーション

は回路解析と電磁波解析は一度に求められるが、パワエレ機器の複雑な回路動作の解析と電磁波解析を連携することは難しい。放射ノイズシミュレーションは、主にモデル化、回路解析、電磁波解析に分けられ、それぞれで異なる解析ソフトウェアを使用しているため、これらの手順をつなぐためのデータの受渡ししが要点になる。まず、インピーダンスのモデル化に関しては、LCRの回路素子を組み合わせた集中定数回路ではなく、分布定数回路を模擬しなければならない。特にプリントパターンや部品の配置が大きな影響を与えるため、電磁界解析を活用して分布定数回路によるモデル化を行い、回路解析に反映する。回路解析では、各所に形成されるアンテナに流れる電流を求める。アンテナは装置の至る所に予期せず形成されるが、支配的となるアンテナを抽出し電磁波解析に反映する。電磁波解析では、主要なアンテナの形状だけをモデル化し、流れる電流に基づき10m離れた放射電界を導出する。

図3(b)には、インバータからの放射ノイズを解析するためのモデル例を示している。インバータはIGBT周辺の構造をループアンテナで、入出力ケーブルはダイポールアンテナで模擬した。ここで、ループアンテナの実効面積と、ダイポールアンテナの実効長は解析精度に大きく寄与するため、これらを正確に模擬したアンテナ形状としなければならない。また、位相差によって生じるアンテナ間の干渉については、アンテナごとの電磁波解析結果を基にデータ処理で求める。

これらの手順で求めた放射電界強度のシミュレーション結果の例を図3(c)に示す。パワエレ機器で大きな電磁ノイズを生じる30～300MHzの範囲で、おおよその傾向が一致していることが確認できる。ただし、精度の改善に加え、支配的な放射源となるアンテナを事前に把握する方法など、多くの課題がある。

3 電磁ノイズシミュレーション技術の活用事例

3.1 製品開発への適用

2章で述べたように、パワエレ機器の電磁ノイズシミュレーションは、高精度に装置や測定環境を再現することで、良好な精度を得ている。しかし、煩雑な手順に加え、解析時間が長いなど、このままでは製品開発に活用しにくい。そこで、伝導ノイズシミュレーションについては、製品の開発工程に応じて、簡単な解析モデルと詳細な解析モデルを使い分けて適用している⁽³⁾。

放射ノイズシミュレーションは、結果を得るには伝導ノイズシミュレーション以上に多くの手間と時間を要するため、より有効な対象に絞って適用を検討している。ここでは、パワエレ機器の筐体(きょうたい)の設計に活用した事例について述べる。

図4に、筐体部の解析事例を示す。図4(a)に示すようにインバータの筐体は、冷却フィンや板金を組み合わせる場合やアルミダイカストで一体成型する場合があり、前者の方が、放射ノイズが大きくなる傾向がある。筐体は接地されているので理想的には全て同じ0Vであるが、大きな面積を持つため微小な電位変動が生じる。この微小な電位変動に起因して大きな放射ノイズが発生することが判明したため、微小電位変

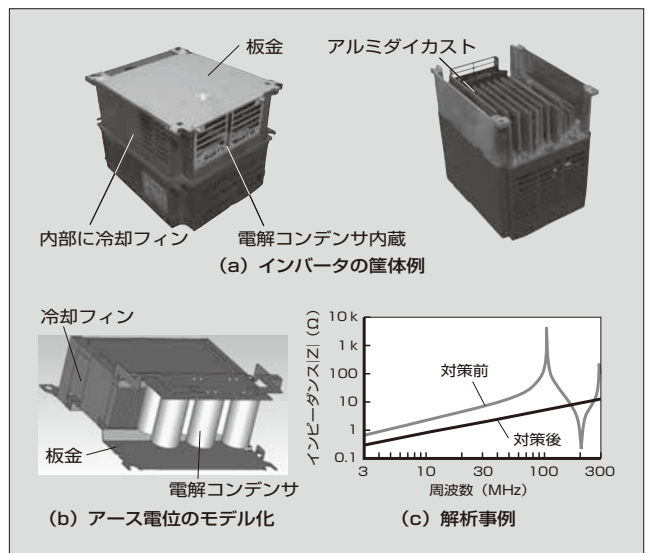


図4 筐体部の解析事例

動を抑制する筐体の設計にシミュレーションを活用している。図4(b)は、接地電位となる冷却フィン、板金と電解コンデンサを抽出した解析モデルである。このような部分モデルを使ったシミュレーション結果を基に、微小な電位変動を抑制したい接続点間のインピーダンスを低くし、かつ図4(c)に示すように不要な共振ピークが生じない構成になるように設計する。これにより、放射ノイズの低減に効果がある。

このように、装置の一部を抽出したシミュレーションの場合、モデル化が簡単で解析時間が短いため、解析を繰り返しながら、より良い構成を探ることができる。

3.2 高精度化の検討

製品固有の回路・構造に起因して、発生メカニズムが判然とせず、対策が難しい電磁ノイズが生じる場合には、より詳細なモデルを構築し、さらに解析精度を高めることで発生メカニズムを把握し、対策法の立案へとつなげている。

(1) モード転化

伝導ノイズでは、モード転化と呼ばれる現象がある。アース線を伝わるコモンモード成分と、電力供給線を伝わるディファレンシャルモード成分が、各部を伝わる途中で流れる経路が変わることをモード転化と呼ぶ。このモード転化によるノイズは一般的に低減が難しい。実測ではモード転化の発生を把握することすら難しいが、シミュレーションを用いると比較的簡単にモード転化の経路やメカニズムをつかめる。また、モード転化によるノイズを低減するために、モード転化の経路を消す、共振周波数をずらすなど、実測だけでは見つけにくい対策を立案できる。

(2) スイッチング特性のモデル化

電磁ノイズのシミュレーション精度を改善するために、発生源であるパワー半導体のスイッチング特性を正確にモデル化する技術も開発している。パワー半導体の開発では、単発のスイッチング特性を精度よく再現するデバイスシミュレータが活用されてきたが、スイッチングを繰り返すパワエレ機器の回路動作と組み合わせることは難しかった。このため、電磁ノイズ

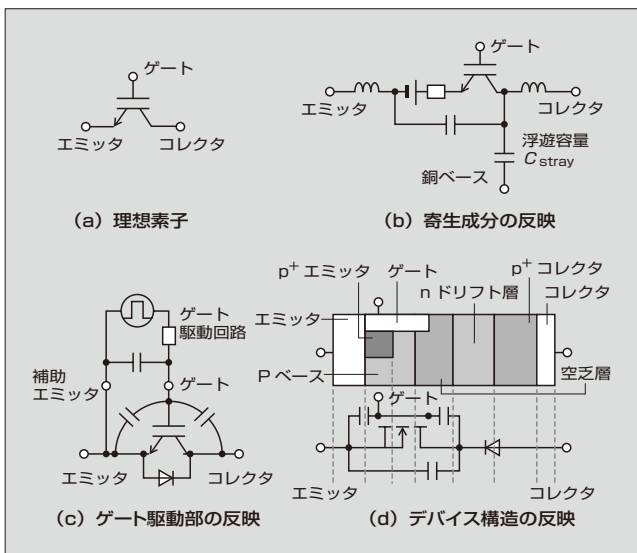


図5 IGBTのデバイスモデルの変遷

シミュレーションの回路解析に適用するパワー半導体のデバイスモデルには多くの課題があった。

図5は、IGBTのデバイスモデルの変遷を示している。図5(a)の理想素子に対し、当初のノイズ解析では、図5(b)に示すように周囲の寄生成分（インダクタンス、キャパシタンス）をモデルに追加していた。浮遊容量 C_{stray} を加えることで、ノイズ経路を漏れなく模擬できるようになった。図5(c)では、さらにゲート駆動部の特性を加え、スイッチング特性をより詳細にモデル化している。ただし、スイッチング特性は測定データにフィッティングさせて再現しているため、周辺回路やデバイス温度が大きく変わると、誤差が大きくなる課題があった。近年は、図5(d)に示すように、デバイス内部構造に基づくモデルを構築し、より高精度にスイッチング特性が模擬できるようになってきた。このモデルを適用することで、実測データを用いなくても、電磁ノイズシミュレーションにおいて高い推定精度が得られるようになった。

3.3 パワーエレクトロニクスシステムへの適用

規格に適合するためだけではなく、現地での電磁ノイズ障害を未然に防ぐことを狙いとして、パワエレ機器、制御装置、検出器などから構成されるパワエレシステムを対象としたシミュレーションの検討も進めている。

モータドライブシステムの構成例を図6に示す。モータドライブシステムは、数十m四方に及ぶ広大な範囲に、大型のトランスやインバータ盤、モータなどを配置する。このようなパワエレシステムでは、接地の取り方によって周囲に放出される電磁ノイズ、ならびにインバータ盤内に配置される制御機器や検出器に流れ込む伝導ノイズが大きく変わる。

従来、モータドライブシステムの各機器は、各機器の電圧や目的に応じて接地抵抗値が規定されたA種～D種の接地極にそれぞれ接続される。しかし、平成23年度の「電気設備の技術基準の解釈」の改正により国際標準規格（IEC）に示される等電位ボンディングによる施工が認められるなど、接地施工の選択肢が増えた。さまざまな接地条件の優劣を事前検証により

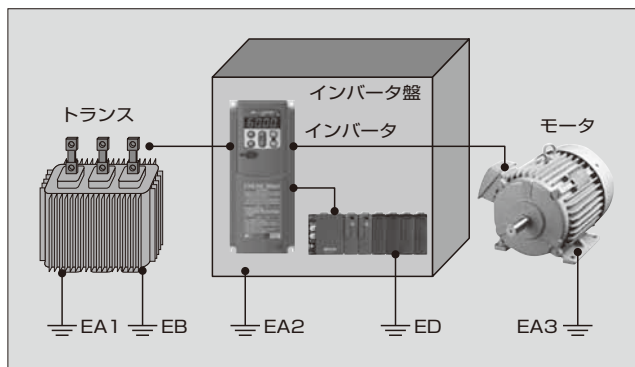


図6 モータドライブシステムの構成例

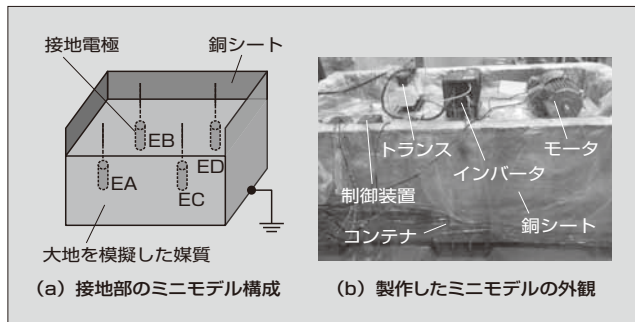


図7 接地部の影響を評価するミニモデルの構成

把握できれば電磁ノイズの抑制に効果的である。

そこで、接地部が電磁ノイズに与える影響を把握するため、接地部の影響を評価するミニモデルを構築した(図7)。このミニモデルは、図7(a)に示すように、大地を模擬した媒質をコンテナ内に敷き詰め、接地極を模擬した電極を埋め込んでいる。その上で図7(b)に示すように、各接地電極に接続されたトランス、インバータ、モータ、制御機器を組み合わせることで、2m×1mほどの面積でパワエレシステムのミニモデルを構築した。このモデルの検証結果を活用し、接地部の挙動を模擬した等価回路を構築した。前述の伝導ノイズシミュレーションと組み合わせることで、パワエレシステムの接地を介する電磁ノイズの挙動を把握できるようになった。これにより、現地で施工できる各種機器の接地方法の最善な組み合わせを事前に把握できるようになった。

4 あとがき

富士電機のパワーエレクトロニクス機器の電磁ノイズシミュレーション技術について述べた。パワーエレクトロニクス機器が発生する電磁ノイズを机上で再現することから始めた検討は、解析精度の改善にとどまらず、簡素化による製品開発への適用、パワーエレクトロニクスシステムへの適用など、現在は幅広く活用している。

今後も、電磁ノイズシミュレーションの適用範囲を広げ、電磁ノイズ障害を未然に防ぐ技術の確立に向けて取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) パワーエレクトロニクス機器のEMC解析・抑制技術共同研究委員会編. パワーエレクトロニクス機器のEMC. 電気学会, オーム社.
- (2) 玉手道雄ほか. シミュレーションによるパワーエレクトロニクス機器のEMCフロントローディング設計. 富士時報. 2009, vol.82, no.3, p.165-169.
- (3) 望月昌人. 産業用モータ駆動インバータにおける機能安全とEMC. 月刊EMC. 2013, no.304, p.52-61.
- (4) 松本寛之ほか. パワーエレクトロニクス機器のシミュレーション技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.66-70.
- (5) 市瀬彩子ほか. 電力変換システムの接地極間ノイズ干渉を模擬する接地ミニモデルの構築. 平成27年電気学会産業応用部門大会, 1-111.



玉手 道雄

パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター電機制御技術開発部主査。博士（工学）。電気学会会員。



林 美和子

パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター電機制御技術開発部主任。電気学会会員。



市瀬 彩子

パワーエレクトロニクス機器の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター電機制御技術開発部主任。電気学会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。