

距離リレーの高速化技術

High-Speed and Highly Precise Distance Relay Technology

高荷 英之 齋田 穰

■ TAKANI Hideyuki

■ SAITA Yutaka

電力系統保護分野において、送電線などの系統事故発生時に、事故点までの電気的距離^(注1)を算出し、その値に応じて事故選択する距離リレーが幅広く利用されている。従来、距離リレーは、高速選択性に優れた主保護を補う後備保護としての適用が中心であったが、近年、電力系統保護の信頼度向上と自由度のある保護運用の観点から、距離リレーについても主保護として利用できるよう、高速化及び高精度化のニーズが高まりつつある。

東芝は、このようなニーズに応えるために、距離計測演算アルゴリズムの改良により、動作時間を従来比でおよそ40%短縮するとともに過渡現象に対する安定性を向上し、高速化と高精度化を両立した距離リレーを開発した。

Distance relays are widely used for power system transmission line protection. A distance relay is activated according to the distance from the relaying point to the fault point given by the calculation of impedances. Conventionally, these devices have mainly been used for backup protection. Recently, however, there has been a movement toward using them also as a main protection because they are expected to provide higher reliability in power system protection. For this purpose, they are required to have high-speed and high precision.

Toshiba has developed a high-speed and highly precise distance relay with an operation time improved by as much as 40%. In addition, incorrect operation by overreach is prevented by minimizing transient fluctuating measurement errors.

1 まえがき

信頼性の高い安定した電力供給が要求される系統運用において、保護リレーは、系統事故が生じた場合に確実かつ高速にこれを検出して、事故区間の適切な除去指令を行う責務がある。

送電線の事故において、誘導電流による通信線への影響を防止するには高速遮断が必要であり、現状では、事故選択性に優れている、専用の通信装置を併用したPCM (Pulse Code Modulation) 電流差動リレーが主流である。このため、送電線保護はPCM電流差動リレーを主保護とし、これをバックアップする目的で距離リレーにより後備保護する方式が一般的となっている。距離リレーが、高速な事故遮断と事故選択性を持つことになれば、系統運用の自由度も増すことになる。

一般に、主保護PCM電流差動リレーと組み合わせて用いられる距離リレーは、自区間の距離の60~80%程度に整定され、装置遮断指令は50ms以下で出力するよう規定されている⁽¹⁾。そこで、距離リレーを主体とした保護を可能にすることを考慮し、第1段要素を自区間の80%を超えて保護する

(注1) 送電線は、使用されている線種により1km単位でインピーダンスが公称されている。送電線保護の場合、距離リレー設置点から事故点までの距離に比例した送電線のインピーダンスを計測することにより、事故点までの距離(電気的距離)がわかる。

運用も想定して高精度化を検討し、PCM電流差動リレーによる遮断時間相当として、2サイクル遮断器との組合せにより、3.5サイクル遮断が可能な距離リレーを開発した。

ここでは、送電線保護用距離リレーのいっそうの高速化と高精度化の実現に向けての課題、及び解決した技術について述べる。

2 距離リレーの原理、構成、及び性能上の留意点

2.1 距離リレー方式

距離リレーは、事故点までのインピーダンス値を測定し、その値が保護区間内であるかどうかを判断して動作するのである。

図1に示すように、送電線鉄塔への落雷などの事故発生によりインピーダンス値が保護区間内に入った場合に、距離リレーが動作して遮断器へ遮断指令を出力する。

事故点までのインピーダンス(R :抵抗分、 ωL :リアクタンス分)の算出方法については表1に示すように、従来は、電圧ベクトルと電流ベクトルを用いた内積演算や外積演算により判定していたが、最近では、リレー設置点から事故点までの電圧降下を示す微分方程式又は積分方程式に基づく高度な距離計測(以下、測距と略記)が普及しつつある。

微分及び積分の電気量は直接導入できないことから、電流及び電圧から近似することになり、より高い精度の近似演

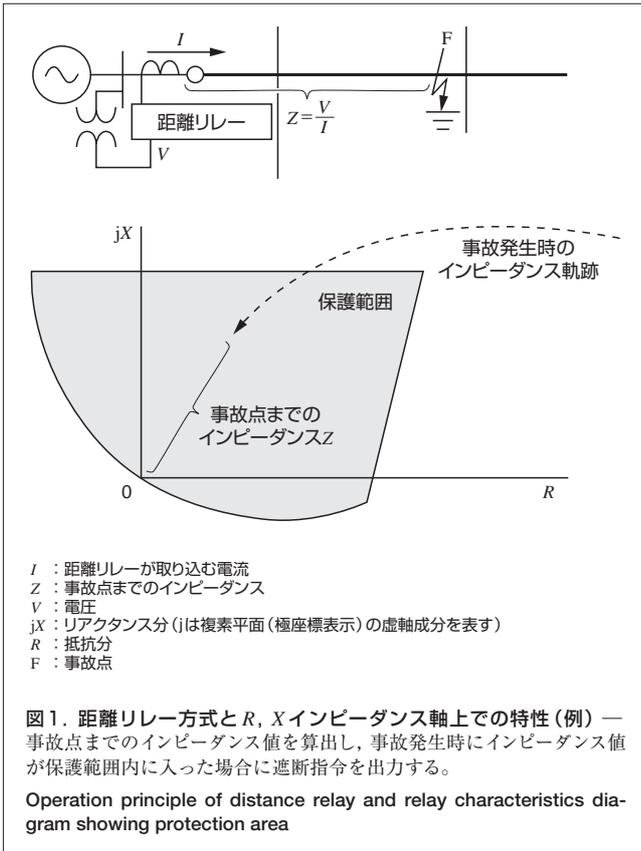


表1. インピーダンス算出方法
 Impedance calculation equations

原理	算出方法
ベクトル計算	$R = \frac{VI \cos \theta}{I^2}, \quad \omega L = \frac{VI \sin \theta}{I^2}$
微分方程式	$v = Ri + L \frac{di}{dt}$ に基づき R, L 算出
積分方程式	$\int v dt = R \int i dt + Li$ に基づき R, L 算出

v : 電圧
 L : インダクタンス
 i : I の複素平面上の実軸成分
 di/dt : I の複素平面上の虚軸成分

算を行うことが測距計算上のポイントである。

積分方程式では、累積加算処理で得られる積分結果がフィルタリング作用を持つため、高調波成分の除去あるいは減衰効果が期待できる。したがって、高調波除去を目的に専用に設けるフィルタ特性を簡素化できるため、周波数特性を犠牲にすることなく、高速化が図れる利点がある。

また、距離リレーにとって、保護区間内の事故を高精度に判別することは非常に重要な性能であり、代表例として、表2に示すような現象と課題がある。距離リレー高速化の観点では、単に高速化するだけでなく、これらの機能及び性能を

表2. 距離リレーの考慮すべき主な項目

Key objectives of distance relays for highly precise protection

No.	項目	説明
1	周波数変動及びひずみ波(高調波)対策	周波数変動及び直流、ひずみ波(高調波)など、基本波以外の影響を極力受けないようにする。
2	過渡オーバーリーチ*	事故発生時に過渡的に発生する波形変化などの影響により、事故発生地点が保護区間外にもかかわらず、保護区間と誤認するようなオーバーリーチを回避する。
3	他相オーバーリーチ対策	事故相ではない健全相インピーダンスが保護範囲内に入り不要な動作をするおそれがあるため、その阻止対策が必要である。
4	負荷電流対策	事故相であっても、負荷電流や事故時の抵抗分によってはインピーダンス測定に誤差を生じ、不正な応動のおそれがあるため、この対策が必要である。

*オーバーリーチ：動作範囲が動作限界を越える現象

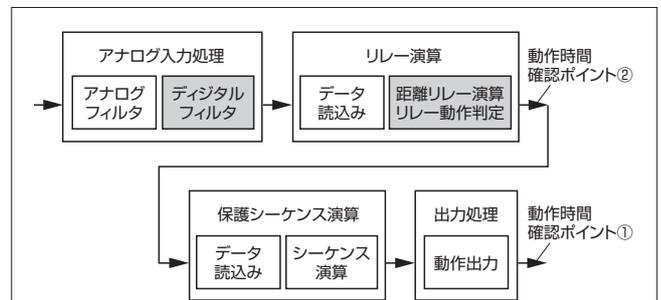


図2. 距離リレーの基本構成 — 距離リレーは主にアナログ入力処理、リレー演算、保護シーケンス演算、及び出力処理から構成される。

Configuration of distance relay

十分確保する必要がある。

2.2 距離リレーの構成

デジタル形距離リレーの基本構成を図2に示す。デジタル形距離リレーの場合、保護方式ごとのアプリケーションに依存する部分で動作時間にかかわる主なポイントは、デジタルフィルタ処理とリレー演算処理の部分である。

デジタルフィルタは、入力波形の高調波成分の影響を軽減する目的でアナログフィルタとともに用いられる。一般に、広域帯で十分なフィルタ減衰効果を得るためには、フィルタ関数に用いるデータ窓長は長くなり、これに伴いフィルタの応答が遅れる傾向になる。フィルタの要求性能を維持しつつ、高速化を実現できることが大きな課題になる。

3 高速化技術

3.1 高速化アルゴリズム

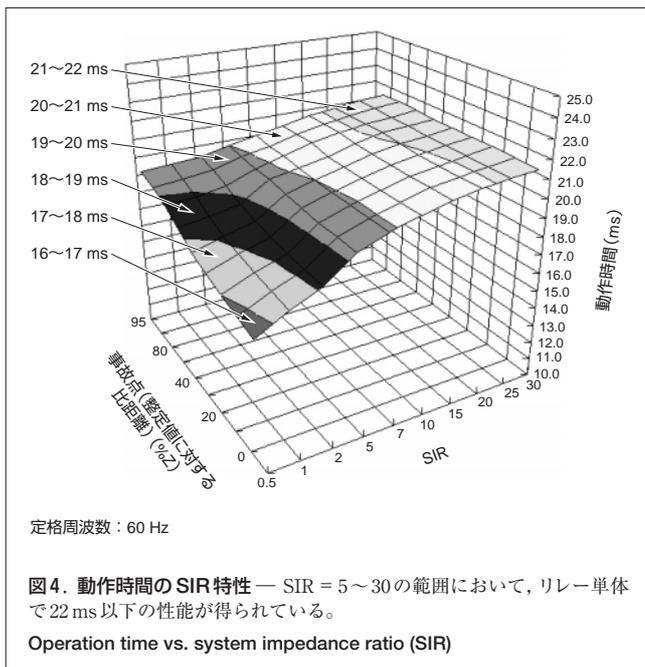
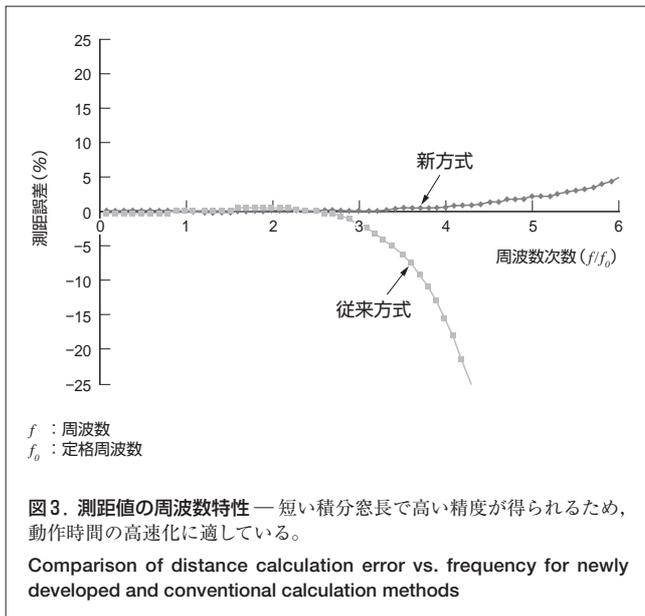
リレー演算と前段のフィルタ処理を統合した設計とし、演算アルゴリズムには前述のフィルタ効果が得られる積分形を用い、かつ、データ窓長が短いながらも従来以上の近似精度が得られるよう、2次の曲線関数を基に交流波近似を行う測

距アルゴリズムを適用した。

図3は、周波数パラメータでの測距誤差を新方式と従来方式の代表例でプロットしたものである。従来方式の例では定格周波数の3倍以上から誤差が生じるのに対し、新方式では5倍以上まで精度よく計測していることがわかる。これは、積分演算自身を持つフィルタ効果によるところが大きい。この結果、積分窓長の短縮とともに、積分計算のフィルタ効果によりアナログ入力処理部のデジタルフィルタを簡素化することができ、高速化を実現できた。

3.2 動作時間性能と評価結果

動作時間性能は、定格周波数60 Hzにおいて、装置仕上り



(図2の動作時間確認ポイント①)で25 ms (1.5サイクル) 以内とし、これに2サイクル遮断器を組み合わせ、3.5サイクルでの事故遮断を目標とした。このため、距離リレー単体性能(図2の動作時間確認ポイント②)で22 ms以下を実現させる。

距離リレーの動作時間性能は、電気学会の距離リレー規格であるJEC2516記載のSIR (System Impedance Ratio)⁽²⁾を可変した条件でも評価した。図4は、この動作時間の測定カーブである。SIR = 5～30、整定値に対する比距離(%Z)が0～95%の範囲において最大許容時間(22 ms)以下であり、これは従来方式に比べ15 ms以上の高速化(40%の時間短縮)を達成した。

4 高精度化技術

距離リレーの高精度化を実現するには、測距精度そのものの向上と、距離リレー特有のオーバーリーチ現象などに対する対策が必要である。ここでは、距離リレーの性能課題である後者について述べる。

4.1 過渡オーバーリーチ対策

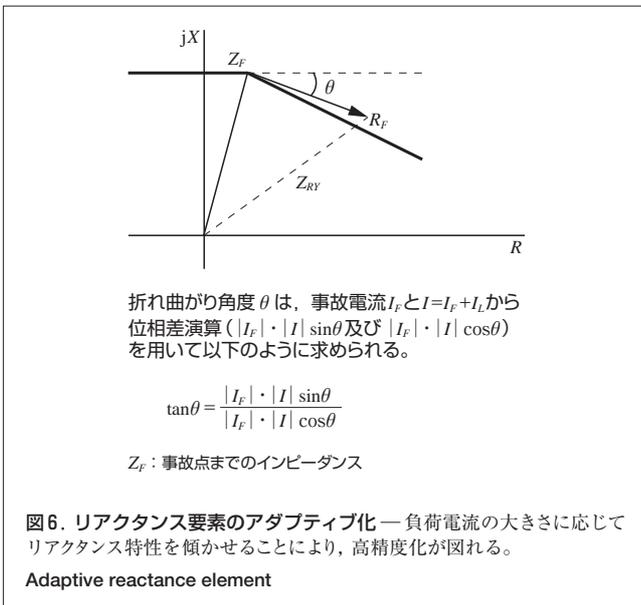
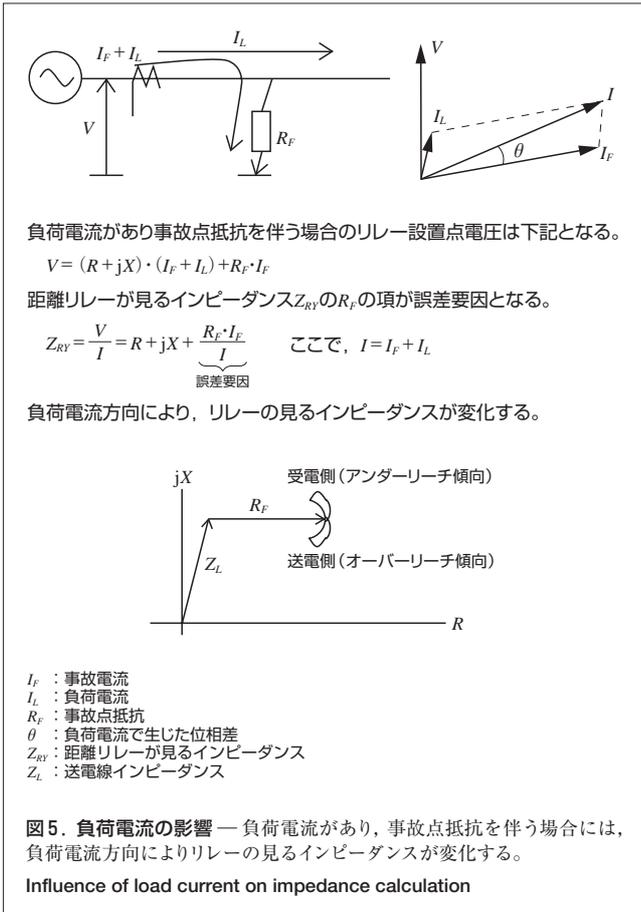
過渡オーバーリーチは、事故発生時の電圧や電流の過渡変動により計算値が収束するまでの期間で発生する動的な測距誤差が要因で、実際のインピーダンスより短く計測することである。この現象は、距離リレーの安定性に影響を及ぼすため、過渡変動誤差は可能な限り小さくすることが望ましい。高速化に伴い、過渡応答面での性能評価として過渡オーバーリーチ精度を確認し、最小整定値である0.1 Ωでも最大で2%以内に収まり、高速化による精度劣化は生じていないことを確認した。

4.2 負荷電流を補償した動作ゾーンの自動制御

系統事故時にアーク発生などで事故点抵抗が伴う場合、図5のように、負荷電流の存在が測距精度に大きく影響する。

図5において、距離リレーが取り込む電流Iは、事故電流 I_F と負荷電流 I_L となる。したがって、 I_L が I_F と同方向となる送電端では、 $I = I_F + I_L$ の重畳値は実際の事故電流より大きくなる。これに事故点抵抗 R_F が影響するため、事故点までの真値 Z_F に対して、距離リレーはリアクタンスを小さく見てしまう。特に事故点 Z_F が保護区間外であるとき、 Z_{RY} がリレー動作域内に入ると誤って動作することになる。距離リレーでは、このような応動は好ましくない。

そこで、電圧を基準ベクトルにとり、事故前後の変化分から事故電流 I_F だけ抽出し、図6内の式から、負荷電流で生じた位相差 θ を算出する。この θ 値を基に、動作ゾーンとなる水平特性を図6のように傾ける(動作域を抑える)ことでオーバーリーチを回避する。このようなアダプティブ化によって、最適な動作ゾーンを自動的に制御でき、系統事故現象の影響を軽減することができる。



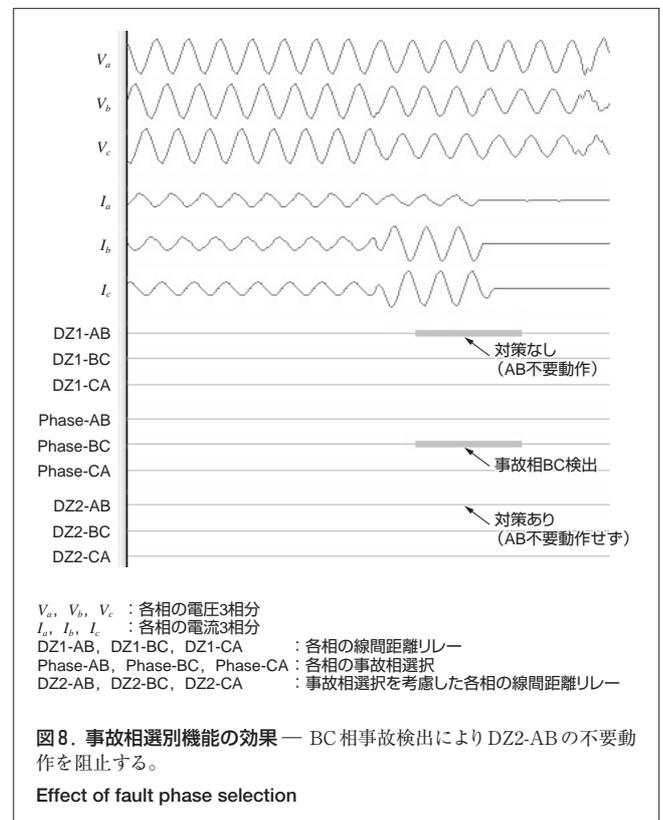
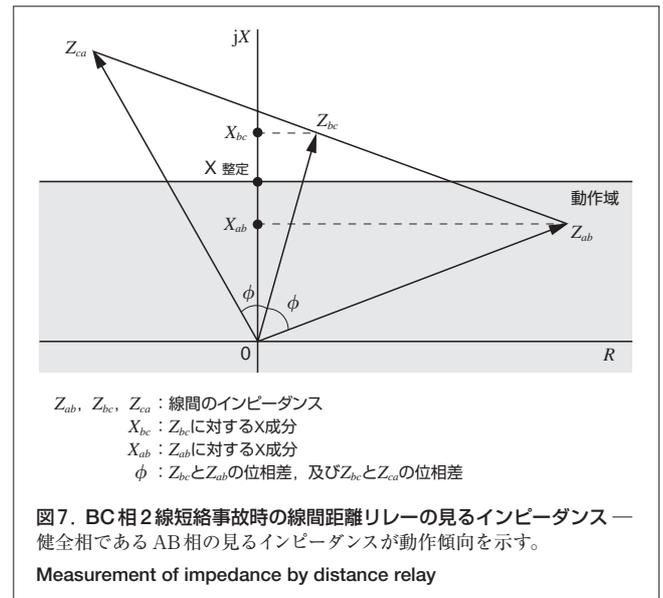
4.3 事故相選択によるオーバーリーチ対策

これまででは、事故相に着目した距離計測を中心に述べたが、ここでは、事故相以外の距離リレーの見えるインピーダンスについて述べる。

距離リレーは、各種の事故様相に対応するために、各相と

線間のインピーダンス($Z_a, Z_b, Z_c, Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca}$)を求めている。一例としてBC相の2線短絡事故を対象とすると、事故相であるBC相リレーは事故点までのインピーダンス Z_{bc} を正確に求めるが、事故時の電圧、電流の大きさや位相関係から、原理上事故相以外のAB相、CA相リレーの見えるインピーダンス Z_{ab}, Z_{ca} は、図7のような関係になることが知られている。

図1のような距離リレーの動作域を持つとき、整定値の大



きさによっては、 Z_{ab} のインピーダンスが動作域に入ることがある。この対策には、事故時の電圧の最小相を検出する事故相選択機能を距離リレーとは別に設け、この動作条件を距離リレーの動作出力相と組み合わせて適用した。

図8は、BC相外部事故時の入力と、線間距離リレー(DZ1, DZ2)及び事故相選択(Phase)の信号であり、DZ2はDZ1に対して事故相選択条件を付加したものである。

動作ゾーン外のBC相事故において、DZ1-ABリレー(Z_{ab})は動作出力となっているが、DZ2はPhase信号がBC相を選択しているため、正不動作の結果である。各事故様相と事故条件から、電圧最小相選択方式の有効性を確認できた。

5 あとがき

距離リレーの高速化及び高精度化の実現方法とその性能について述べた。特に、高速化については2サイクル遮断器と組み合わせて3.5サイクル遮断が可能である。また、高精度化として、過渡オーバーリーチ性能や他相オーバーリーチ性能などについて検証評価し、事故選択能力の向上を図っている。高速性と安定性を兼ね備えた高機能の距離リレーであり、多様な保護システムに適用できる。

文 献

- (1) 電気事業連合会. デジタル形保護継電器および保護継電装置(電力用規格B402). (社)日本電気協会, 1998, 64p.
- (2) 電気学会電気規格調査会. デジタル形距離継電器(電気学会電気規格調査会標準規格JEC-2516). 田中久米四郎, 2001, 8p.
- (3) Ohura, Y., et al. Digital Distance Relay with Improved Characteristic Against Distorted Transient Waveforms. IEEE Transactions on Power Delivery. 4, 4, 1989, p.2025 - 2031.

- (4) 前田隆文, ほか. “高速サンプリングと修正微分近似法距離リレーの考察”. 平成5年電気学会全国大会 講演論文集 11. 熊本, 1993-03. p.11-126 - 11-127.
- (5) 前田隆文, ほか. “高密度積分方式を適用した距離リレーの開発”. 平成6年電気学会 電力・エネルギー部門大会 論文集(論文Ⅱ). 東京, 1994-07. p.357 - 358.
- (6) 滝和市郎, ほか. “高精度・高速化距離リレーの開発”. PPR-04-05. 大阪, 2004-02, 保護リレーシステム研究会. 電気学会, 2004, p.23 - 28.
- (7) 鈴木 守, ほか. “基幹系統送電線超高速保護”. PPR-04-07. 大阪, 2004-02, 保護リレーシステム研究会. 電気学会, 2004, p.33 - 38.



高荷 英之 TAKANI Hideyuki

電力システム社 府中事業所 電力システム制御部主務。保護・制御システムの設計・開発に従事。電気学会会員。
Fuchu Complex



斎田 穰 SAITA Yutaka

東芝電力システムテクノロジー(株) 電力システム部主査。保護・制御システムの設計・開発に従事。
Toshiba Power Network System Technology Corp.