

配電盤の内部アーク故障における圧力上昇の解析

Analysis of Pressure Rise During Internal Arc Faults in Switchgear

浅沼 岳 ASANUMA, Gaku

恩地 俊行 ONCHI, Toshiyuki

外山 健太郎 TOYAMA, Kentaro

配電盤には、電路の開閉、電力の計測・監視などを担う重要な機器が収められており、IEC 規格では、配電盤内部でアーク放電（内部アーク故障）が発生した場合の安全性能を規定している。富士電機は、安全な配電盤を設計するために内部アーク故障時の圧力上昇と放圧性能を予測する解析技術を開発した。実機試験の結果から導出したアークモデルと放圧装置近傍の圧力損失モデルを取り込んだことで、精度の高い解析が可能になった。この解析技術を用いて IEC 規格に対応した配電盤を開発した。

Switchgear include devices that play an important role in operations such as electric circuit switching and power measuring and monitoring, and IEC standards stipulate safety performance criteria regarding arc discharge (internal arc faults) in switchgear. Fuji Electric has developed an analysis technology for predicting pressure rise and pressure discharge performance during internal arc faults in order to design safe switchgear. By incorporating a pressure loss model in the vicinity of devices that discharge pressure and an arc model derived from the results of actual device testing, we have been able to implement highly accurate analysis. We have developed IEC standard compliant switchgear based on this analysis technology.

1 まえがき

電力系統と電力機器を結ぶ受配電設備において、配電盤には電路の開閉、電力の計測・監視などを担う重要な機器が収められている。海外向けの配電盤には IEC 規格（IEC 62271-200）が適用される。この規格では、故障時や保守時における周囲の人の保護に関する分類など、安全な構造に対する考え方が強化されている。この中で、配電盤の内部でアーク放電（内部アーク故障）が発生した場合の安全性能が規定されている。内部アーク故障が発生するとアークからのエネルギー供給によって配電盤内部の雰囲気ガスが加熱され、ガスの温度上昇に伴って内圧が上昇する。配電盤の筐体（きょうたい）が圧力上昇に耐えられない場合には、漏れ出た高温ガスが周囲の人に吹き掛かり重大な事故に発展してしまう。そのため、配電盤において内部アーク故障を予防するインタロック技術とともに、万一、内部アーク故障が発生した場合でも配電盤内部の高温ガスを安全に盤外に放出する技術が重要である。

本稿では、安全な配電盤を設計する技術として、内部アーク故障時の圧力上昇と放圧性能を予測する解析技術について述べる。

2 解析手法

内部アーク故障が発生すると、次のように動作して配電盤の筐体の破損が防止される。

- アークエネルギー（加熱エネルギー）による内部圧力の上昇
- 規定圧力での放圧装置の動作
- 放圧装置を介した高温ガスの放出
- 配電盤内部の圧力の低下

このため、筐体や放圧装置の設計に際しては、内部アーク故障時の圧力上昇値を予測しなければならない。具体的には、発生するアークエネルギーと内部の圧力上昇との相関性、および放圧装置の動作性能を予測することが必要である。

アークエネルギーを予測するためには、系統電圧とインピーダンスの関係、および短絡電流と発生するアーク電圧の関係を考慮した回路解析を行う。アーク電圧は、アークの両端に発生する電位差であり、配電盤内部の圧力上昇を引き起こす一方で、系統電圧に対して逆起電力となることから故障時に系統を流れる電流を制限する作用がある。このアーク電圧は、アーク長、電極材料およびアークに流れ込む電流によって時々刻々と変化するため、精度良く推定することが重要である。

一方、配電盤内部の放圧性能を予測するためには、噴出する高温ガスの質量流量を熱流体方程式で解いて求める必要がある。ただし、内部アーク故障によってアーク周囲のガスは数百 K～数千 K の高温になり、その過程で電離や解離を生じるため、ガス密度や比熱は非線形的に変化する。特にガス圧力はガス密度に大きく依存する。そのため、ガスの物性値の非線形的な振る舞いも考慮しなければならない。また、図 1 に示すように、放圧装置は放圧時に回転動作を伴い、その周囲に高温ガスが流れて周囲に圧力損失の一因となる非定常な渦を発生させる。このため、放圧装置周囲の圧力損失を予測するのは難しい。

今回、実機試験の結果から導出したアークモデルと放圧装置近傍の圧力損失モデルを数値解析に組み込むことで、内部アーク故障時の圧力上昇に対する精度の高い解析手法を構築した。

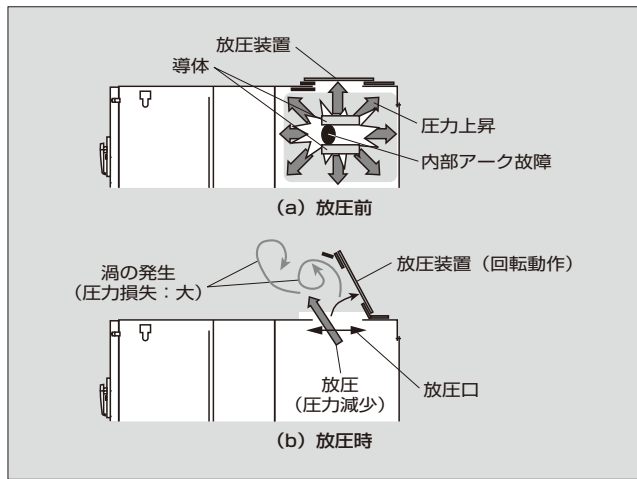


図1 放圧装置の動作

2.1 アークモデルの構築

アーク電圧は、式(1)の第1項に示す陽光柱電圧と第2項に示す電極降下電圧の和で表すことができる。陽光柱とは、電極間で強い発光状態が観測される部分である。

$$V_{arc} = E_{arc} L_{arc} + V_{con} \dots\dots\dots(1)$$

$$E_{arc} = f(I_{arc}) \dots\dots\dots(2)$$

- V_{arc} : アーク電圧 (V)
- E_{arc} : アーク電界 (V/m)
- L_{arc} : アーク長 (m)
- V_{con} : 電極降下電圧 (V)
- I_{arc} : アークに流れ込む電流 (A)

電極降下電圧は、電子やイオンが電極に衝突して発生する電極近傍の電圧であり、電極材料に固有の値である。配電盤の電力線やブスバーで使用されている銅の場合、電極降下電圧は16.5V⁽¹⁾である。一方、式(2)で示すように、陽光柱電圧を構成するアーク電界はアークに流れ込む電流（通電電流）に依存する。そのため、アーク長（電極間距離）、通電電流、アーク電圧を定義することにより、式(1)と式(2)を用いてアーク電界を実験的に求めることができる。そこで、図2に示すように、アーク電界評価用の基礎試験によ

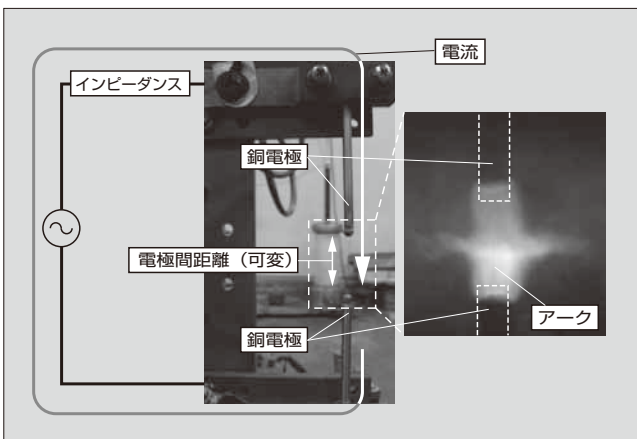


図2 アーク電界評価用の基礎試験の様子

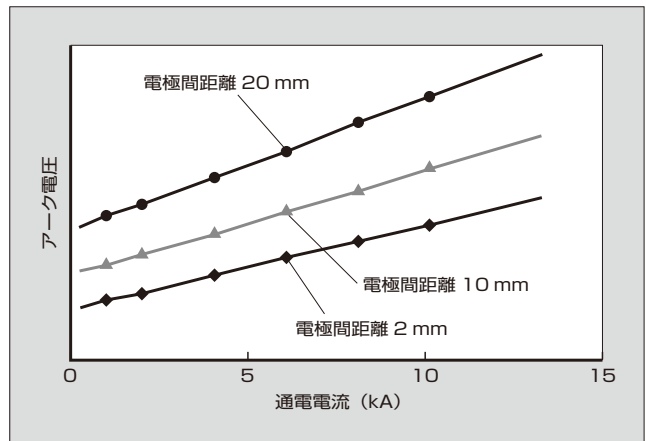


図3 通電電流とアーク電圧の関係

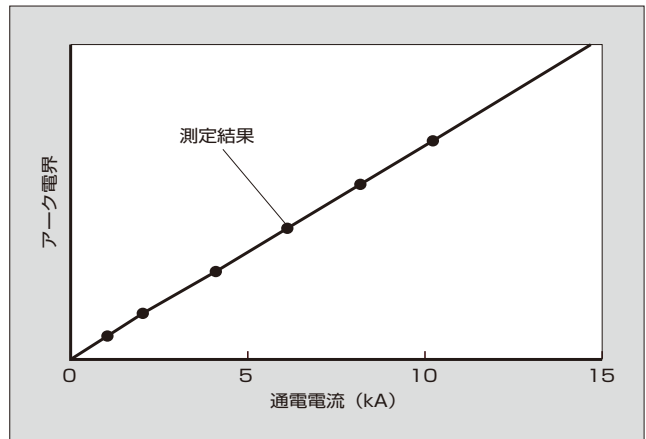


図4 通電電流とアーク電界の関係

りアーク電界の電流依存性について評価・取得を行った。試験パラメータは次の二つとした。

- 電極間距離 L_{arc} : 2 ~ 20 mm
- 通電電流 I_{arc} : 1 ~ 10 kA

図3に、各電極間距離における通電電流に対するアーク電圧を測定した結果を示す。今回取得した電流範囲においては、アーク電圧と通電電流は線形関係にあることが分かる。さらに、式(1)と式(2)を用いて算出した通電電流に対するアーク電界の関係を図4に示す。アーク電界と通電電流も線形関係にあることが分かる。これを受けて、線形近似によって通電電流に対するアーク電界を定式化し、回路解析のために構築したアークモデルに取り込んだ。

2.2 簡易熱流体解析手法

熱流体の解析では、一般的に有限体積法が使用されている。配電盤内の雰囲気ガスは空気（圧縮性の粘性流体）であり、放圧動作時において放圧装置近傍には粘性による渦の発生と、開口部の流路断面積の変化（急縮小急拡大）によって圧力損失が発生する。また、放圧装置は回転動作によって時間経過とともに角度が変化する。そのため、圧力損失も非定常である。この圧力損失の変化を予測するためには、時間とともに変化する放圧装置の形状を考慮した流体方程式を解く必要がある。形状変化を伴った構造にお

ける流体の非定常連成解析では、計算時間が増加してしまい、個別設計となる配電盤の実設計に適用するのは困難であった。

今回開発した簡易熱流体解析手法は、計算時間の短縮と解析精度の担保の両立を目指し、計算負荷の高い放圧動作時の挙動を実測して解析に反映することで、内部アーク故障時の圧力上昇予測に特化した有限体積放熱流体解析手法として構築した。この手法の特徴は次に示す三つである。

(1) 直方体メッシュによる要素分割

矩形で構成されている一般的な配電盤の三次元形状を模擬するために、直方体のメッシュを使用して要素分割を行った。

(2) 物性値の非線形性への対応

内部アーク故障時は、ガスの電離・解離によって圧力・温度に関わる物性値（密度，比熱，熱伝導率）に非線形性が生じる。構築した手法はこの非線形性に対応しており、電離・解離による圧力の急激な変化などを精度良く解くことができる。

(3) 精度を担保した放圧部の解析

放圧装置近傍の粘性による圧力損失を考慮するため、基礎試験で放圧装置の開口面積，回転角度，圧力損失と，放圧口を通過するガス流速との関係を実測し，解析に取り込んだ。これによって，計算負荷を抑えた上で精度を担保した放圧部の解析を可能にした。

2.3 放圧装置近傍の圧力損失特性の取得

放圧装置近傍の圧力損失特性を取得するため，放圧装置を持つ压力容器を用いて基礎試験を実施した（図5）。試験は，压力容器に高圧ボンベから加圧空気を充填した後，可動レバーを引き抜いて放圧を行った。放圧時の放圧装置近傍の圧力損失を圧力センサで測定するとともに，圧力の変化から容器外に排気されたガスの流出速度を推定した。また，放圧装置の回転角度の変化をハイスピードカメラで取得した。

試験パラメータは，放圧口の開口面積，放圧装置の最大回転角度，压力容器への充填圧力とし，圧力損失との関係

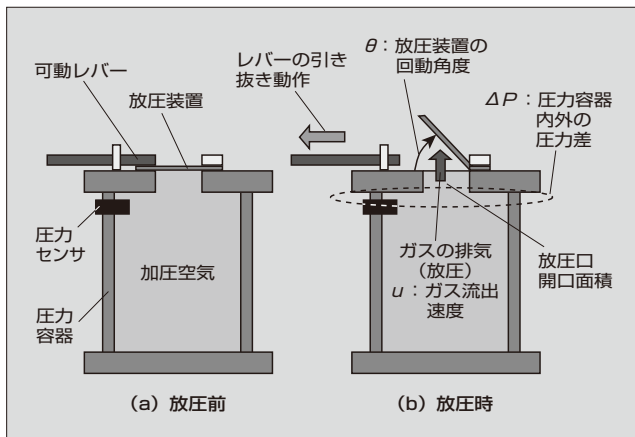


図5 放圧装置近傍の圧力損失特性を取得するための基礎試験の概要

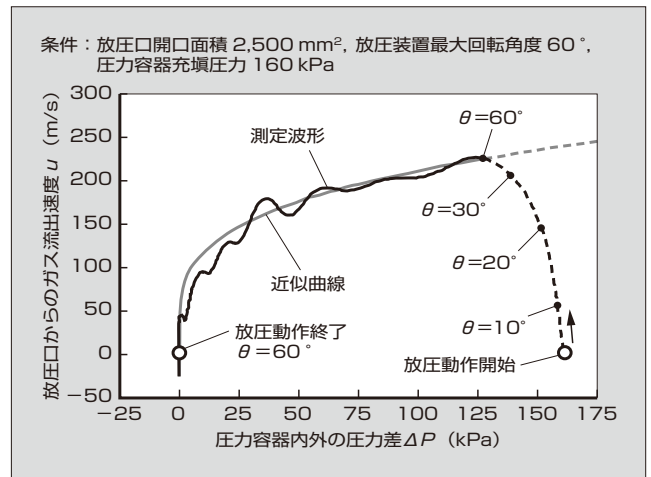


図6 放圧装置近傍の圧力損失特性の例

を評価した。

試験結果から得られた圧力損失特性の例を図6に示す。放圧口から流出するガスの流速は，放圧装置の回転とともに増加し，最大回転角度（図6の場合は60°）で最大となる。その後，容器内の圧力が減少するとともに，流速も減少していく。このガス流速の減少過程は非線形形であるが，放圧口近傍の圧力損失，放圧装置の最大回転角度，放圧口の開口面積から導出した近似曲線で模擬することで解析に取り込んだ。

③ 解析結果

開発した解析手法の妥当性を評価するため，二つの試験を実施し，解析との比較を行った。

(1) 放圧時の圧力減少過程

放圧時の圧力の減少過程における解析精度の妥当性を確認するために，前述の压力容器を用いた放圧試験との比較を行った。表1に試験条件を示す。この試験は，アークによるガスの加熱（圧力上昇）がないため，解析に取り込んだ放圧装置近傍の圧力損失モデルの妥当性のみ評価できる。図7に，放圧時の圧力減少過程における実測結果と解析結果の比較を示す。実測結果と解析結果の圧力波形はよく一致しており，放圧時の現象を模擬できている。また，放圧口の開口面積が大きく，放圧装置の最大回転角度が大きい場合，放圧口を通過するガス量が多く，ガス流の慣性力によって0 kPa付近でダンピング現象が発生しており，解析でもこの現象を模擬できていることを確認した。

(2) アーク発生時の圧力上昇過程

アーク発生時の圧力上昇過程における解析精度の妥当性

表1 压力容器を用いた放圧試験の試験条件

条件番号	放圧口寸法	压力容器 充填圧力	放圧装置 最大回転角度
テストケース 1	50 × 50 (mm)	200 kPa	30°
テストケース 2	70 × 70 (mm)	200 kPa	60°
テストケース 3	100 × 100 (mm)	75 kPa	90°

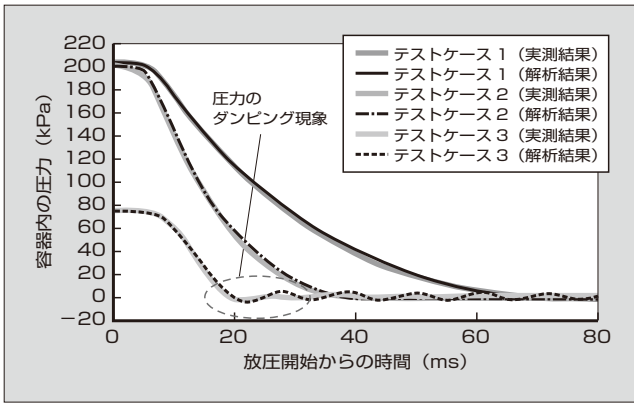


図7 放圧時の圧力減少過程における実測結果と解析結果の比較

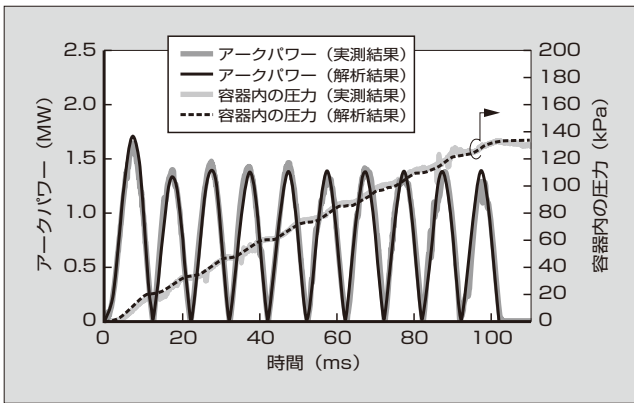


図8 アーク発生時の圧力上昇過程における実測結果と解析結果の比較

を確認するために、圧力容器を密閉し、容器内部でアークを発生させた際の圧力上昇値の実測結果と解析結果を比較した。アークパワーについての回路解析の算出結果、ならびに算出したアークパワーを入力とした簡易熱流体解析の算出結果について、それぞれの実測結果との比較を図8に示す。アークパワー波形、圧力波形とも実測とよく一致しており、この解析手法が圧力上昇時の現象を模擬できることを示している。

4 IEC規格対応配電盤への適用

開発した内部アーク故障時における圧力上昇の解析手法を用いて、IEC規格に対応した配電盤について検討した。解析条件は、国際規格のIEC 62271-200に準拠した内部アーク試験の試験条件と同様とし、表2に記載の内容とした。図9に回路解析によって導出した相間のアークパワー波形を示す。解析の結果、アークパワーは内部アーク故障発生直後に最大値を迎え、その後減少していくことが分かる。

次に、回路解析で得られたアークパワー波形を入力とした圧力解析の結果を示す。図10は、解析を行った配電盤の形状と発弧直後の圧力分布の解析結果である。同図に示すように、アーク部を中心に圧力波が配電盤内を伝搬していく結果が得られた。

表2 IEC規格対応配電盤の内部アーク試験条件

項目	条件
系統電圧(実効値)	11 kV
短絡電流	18 kA
系統周波数	50 Hz
短絡モード	三相短絡

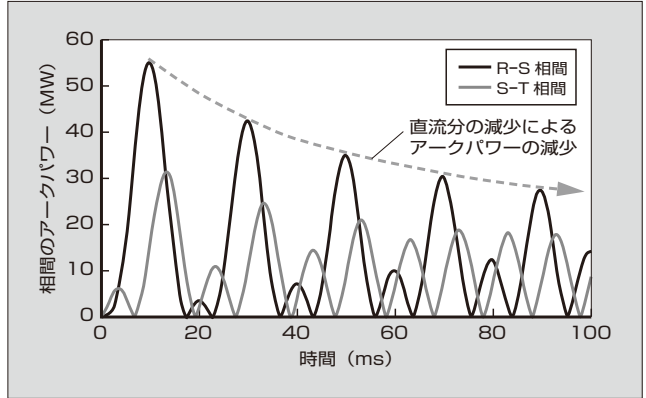


図9 相間に発生するアークパワーの解析結果

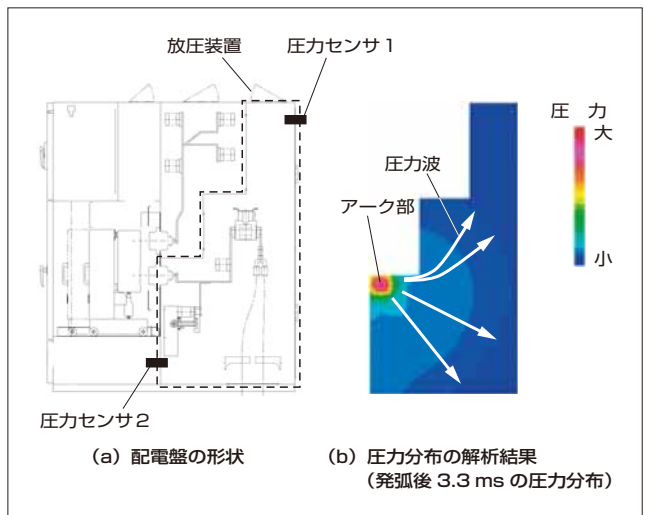


図10 配電盤の形状と圧力分布の解析結果

さらに、解析結果の妥当性を評価するため実測結果と比較した。放圧装置近傍とアーク部近傍にそれぞれ配置した圧力センサによる実測結果と各センサ位置における圧力の解析結果を図11に示す。

内部アーク故障時の圧力は、放圧装置が動作した後も増加していることが分かる。これは、放圧装置が回転動作を開始してから最大開放状態になるまでに数msかかるためである。図11に示すように、実測結果と解析結果はよく一致しており、解析手法の妥当性を確認できた。さらに、本手法は汎用熱流体解析手法に比べて解析時間が短縮され、実設計に適用できるようになった。

図12に示す配電盤の開発において、前述の解析結果を入力データとした構造解析を実施することで、強度を補強する箇所の推定と構造設計へのフィードバックを行った。これにより、IEC規格に対応した製品の開発を完了した。

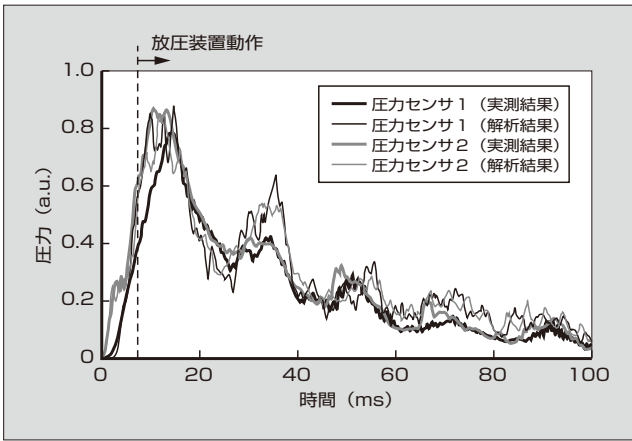


図 11 圧力センサ取付位置における圧力波形の比較



図 12 IEC 規格適合 7.2 kV スイッチギヤ (配電盤)

5 今後の展開

本稿で述べた解析手法を適用することで、配電盤の内部アーク故障時の圧力上昇を予測することができた。この手法は放圧装置から流出する高温ガスの流速や密度、温度を予測することもできるため、今後は、放圧装置を通過した高温ガスの配電盤の外での拡散について検討していく。

6 あとがき

配電盤の内部アーク故障における圧力上昇の解析について述べた。今後も海外、とりわけアジアを中心に電力需要の拡大が見込まれ、それに伴い配電盤の増設や設備更新が予想されている。安全な受配電設備の設計には、解析技術(予測技術)が必要であり、解析精度を確保した上で、実設計で使用できる計算速度を満足するための工夫が必要である。今後も、機器の実設計を見越した解析技術の構築に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) Yokomizu, Y. et al. Total voltage drops in electrode fall regions of SF₆, argon and air arcs in current range from 10 to 20000 A, Journal of Physics D : Applied Physics, 1996, vol.29, no.5, p.1260-1267.



浅沼 岳

遮断器およびアーク関連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先端技術研究所応用技術研究センター電機技術研究部。電気学会会員。



恩地 俊行

低圧遮断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先端技術研究所応用技術研究センター電機技術研究部マネージャー。博士(工学)。電気学会会員。



外山 健太郎

電磁気応用製品の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター電機技術研究部長。日本機械学会会員、日本 AEM 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。