

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 直流変電所の出力電圧を制御する

直流電化方式の電気鉄道における変電所では、交流の電力から列車が必要とする直流の電力への変換を行う整流器が設けられます。変電所の出力電圧を列車の運転状況に応じて変化させることができれば、回生電力の有効利用による省エネルギー化が期待できますが、現在最も普及しているシリコンダイオードを用いた整流器ではこのような制御はできません。最新技術の自励式整流器では電圧制御に加えさまざまな付加機能がありますが、価格がシリコンダイオードを用いた整流器に対して10倍程度と高コストです。そこで、出力電圧の制御が可能で、なおかつこれを低コストで実現した可変リアクトルを用いた新しい整流器を開発しました。



**森田 岳**  
Gaku Morita  
電力技術研究部  
き電研究室  
主任研究員  
【専門分野】 接地技術、  
電磁環境

## はじめに

直流電化方式の電気鉄道における発電所から列車までの電力の流れは図1のとおりです。発電所で作られる三相交流(☞参照)は、電力会社の複数の変電所を経由して電気鉄道用変電所に供給されます。

電気鉄道用変電所には、電力会社から供給される三相交流から列車が必要とする直流への変換を行う変成機器が設けられます。これは、整流器に適した交流電圧に変換する整流器用変圧器と、交流を直流に変換する整流器の二

つの装置から成ります。

整流器が出力した電力は、電車線とレールからなるき電回路により列車まで送り届けられます。電車線とレールの間の電圧を電車線電圧、といいます。電車線電圧は位置によって変わり、たとえば図2(a)のような分布となります。

図2(a)の例では一方の列車(力行車)が力行(加速)中、もう一方の列車(回生車)が回生ブレーキ中です。電車線とレールの電気抵抗のため、一般に電車線電圧は力行車の位置では変電所の位置よりも低く、回生車の位置では変電

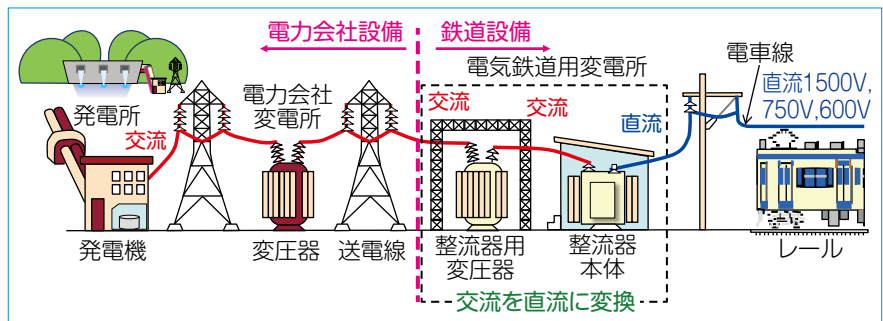


図1 発電所から列車までの電力の流れ(直流電化方式)

### ☞ 三相交流

電気のうち、時間とともに周期的に向き(正負)と大きさが変化するものが交流です。この1周期を360度とした時に、120度ずつタイミングがずれた計三つの交流をセットで送電する方式を三相交流といいます。電線利用率が高い、電力の脈動が無いなど数多くの長所があり、国内外における送電方式の主要方式となっています。

所の位置よりも高くなります。回生車と力行車の間の電車線電圧の勾配が急なほど大きな回生電力を力行車に供給できますが、高すぎる電圧はいろいろな設備にトラブルを起こすので、回生車の位置における電車線電圧には上限があります。この例のように変電所Bの位置における電車線電圧が高い状態であると、回生車が発生できる回生電力の一部が制限されてしまいます。

もし、ここで列車の回生に応じて変電所Bの出力電圧を制御して一時的に下げることができれば、より多くの回生電力を力行車に送ることができるようになり、さらなる省エネルギー化が実現できます(図2(b))<sup>1)2)</sup>。

しかし、現在最も普及している変成機器であるシリコンダイオードを用いた整流器(ダイオード整流器)では、ここに示したような出力電圧制御は不可能です。そこで、ダイオード整流器に可変リアクトルを付加することで出力電圧を制御可能とした、新しい可変電圧整流器を開発しました。

### 電力変換装置の種類と特徴

変電所に現在導入されている変成機器と、今回開発の可変電圧整流器の構成と特徴を表1に示します。

#### ダイオード整流器

ダイオード整流器(表1左側)は現在最も広く採用されている整流器で、一方向にしか電流を流さない性質を有するシリコンダイオードという半導体素子を利用して、交流を直流に変換します。構造がきわめて簡単のため安価で堅牢という特長がありますが、前述の省エネルギー制御に必要な能動的な電圧制御はできません。

#### 自励式整流器

実用の最新技術である自励式整流器(表1中央)<sup>3)</sup>は、半導体スイッチを高速度に動作させることで任意の直流電圧

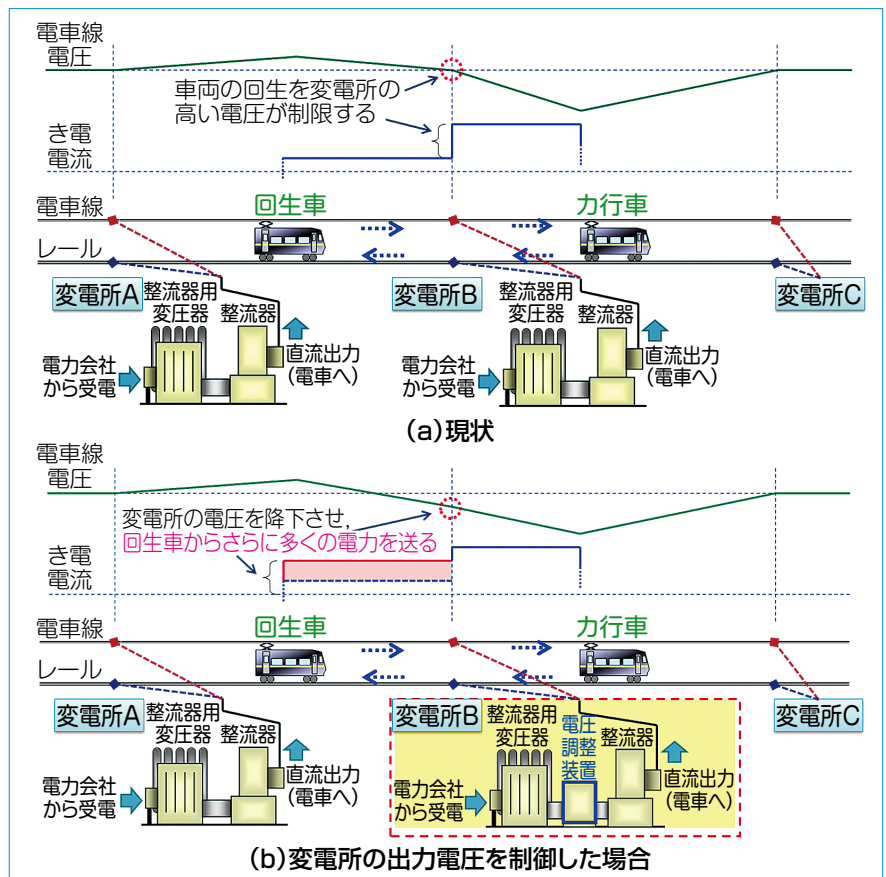


図2 発電所から列車までの電力の流れ(直流電化方式)

表1 従来の変成機器と今回開発の可変電圧整流器の構成と特徴

方式	ダイオード整流器	自励式整流器	開発した可変電圧整流器
機器構成	整流器用変圧器 整流器 三相交流 直流	整流器用変圧器 電力変換装置 三相交流 直流	整流器用変圧器 整流器 可変リアクトル+制御装置 三相交流 直流
電圧調整	不可	可	可
逆潮流	不可	可	不可
既存設備活用	—	不可(全て専用設備)	可(改修は要)
おおよその価格	1(基準)	10	1.5~2
位置付け	現在の標準技術	実用化された最新技術	今回開発の制御技術

を作り出します。電圧制御に加え、逆潮流(列車の回生直流電力を三相交流側に戻す)制御など多くの機能を有しますが、通常のダイオード整流器の10倍程度と高価です。

#### 開発した可変電圧整流器

今回開発した可変電圧整流器(表1右側)は、ダイオード整流器に対する付加機能は電圧制御に限定されますが、従来のダイオード整流器の1.5~2倍程度、自励式整流器との比較では1/5程度のコストで構成可能です。また、整流器用変圧器と整流器は既存のもの

をそのまま利用し、可変リアクトル(参照参照)とその制御装置を追加挿入する導入形態も可能です。

#### 可変リアクトル

リアクトル(一般向け書籍などではコイルと表記)が発生する電圧降下の大きさはインダクタンスという指標で評価されます。理想的なリアクトルではインダクタンスは通電電流によらず一定ですが、本開発の可変リアクトルは外部からの制御電流(直流)によって、インダクタンスの能動的な制御を可能にしています。

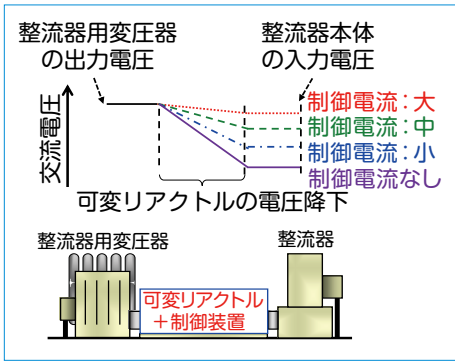


図3 可変電圧整流器の動作原理

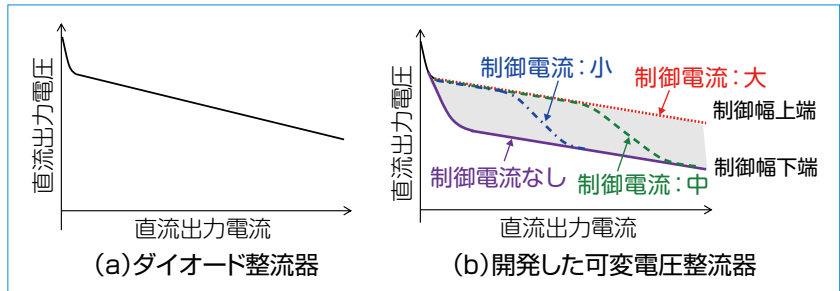


図4 出力電圧特性の違い

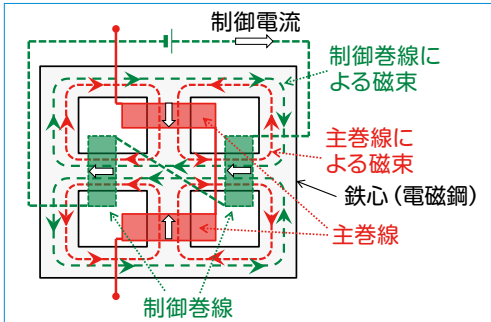


図5 可変リアクトルの基本構成

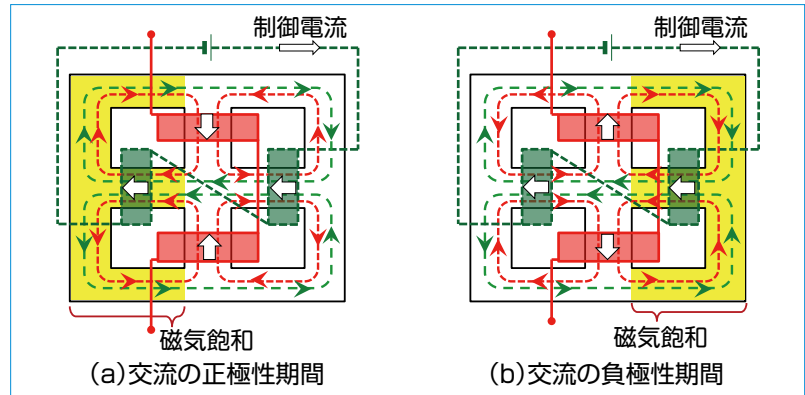


図6 可変リアクトルの制御原理

### 可変電圧整流器の動作原理

開発した可変電圧整流器のキーテクノロジーとなるのが、整流器用変圧器と整流器の間に挿入する可変リアクトル<sup>4)</sup>です。この可変リアクトルに、整流器用変圧器から出力され整流器へ向かう交流電流を流します。一般に、リアクトルに交流電流を流すと電圧降下が生じますが、可変リアクトルはその名の通りインダクタンス値を変化させることができ、電圧降下の大きさを変えられるため、結果として整流器の直流出力電圧を制御することができます。この動作を模式的に描くと図3となります。

ダイオード整流器と可変電圧整流器の出力電圧と出力電流の特性の比較を図4に示します。ダイオード整流器では図4(a)のように出力電流に応じて電圧が直線的に下がる一つの特性となりますが、可変電圧整流器では制御電流の大きさを変えることによって、図4(b)の網かけ部分の範囲内の任意の電圧を出力することが可能です。

可変リアクトルで生じる電圧降下は、電気抵抗で生じる電圧降下と異なり、

ほとんどエネルギー損失を出さないため、電圧制御による効率の低下はわずかなレベルです。

### 可変リアクトルの動作原理

開発した可変リアクトルは東北大学、東北電力㈱、富士電機㈱による開発<sup>5)~7)</sup>を基礎として、鉄道用に新たに設計したものです。

#### 田形磁路

可変リアクトルの基本構成は、電磁鋼板(☞参照)で構成される田形の鉄心に交流を流す二つの主巻線と、直流を流す二つの制御巻線が巻かれた田形磁路(図5)<sup>6)</sup>です。二つの主巻線は向かい合う方向、制御巻線は同じ向きになるよう構成されます。そのため、主巻

線と制御巻線が発生させる磁束(磁界)の流れは図5に示すとおり異なります。

制御巻線に電流を流さない場合、鉄心全体に磁束が流れます(図5の赤色破線)。一方、制御巻線に直流電流を流すと、図6に示すように交流の正負期間に応じて田形磁路の左右いずれかの磁束が強め合う領域(図中の黄色の領域)で磁気飽和(☞参照)が起り、鉄心の見かけ上の断面積が小さくなります。これにより可変リアクトルで生じる電圧降下を変化させることができます。

#### 今回採用した機器構成

田形磁路の鉄心形状は構造が特殊なため、汎用の製造ラインが使えず製造コストが高い上、機器も大きくなるという課題がありました。そのため、汎

#### ☞ 電磁鋼板

変圧器(トランス)、電動機、発電機などの電気機器は、磁束(磁界)を通しやすい鉄心に、電流を流しやすい巻線(絶縁された電線)を巻き付けた構造になっています。この鉄心にはとくに磁界を通しやすいよう最適化された、電磁鋼板という特殊な鋼(はがね)を使うことが一般的です。昔の名称であるケイ素鋼板と記載される場合もあります。

#### ☞ 磁気飽和

真空中や空気中では電流と発生する磁束(磁界)は比例します。一方、電磁鋼板では電流が大きくなるにつれ、比例関係が崩れて発生する磁束の増加率が小さくなる性質があります。この現象を磁気飽和といいます。

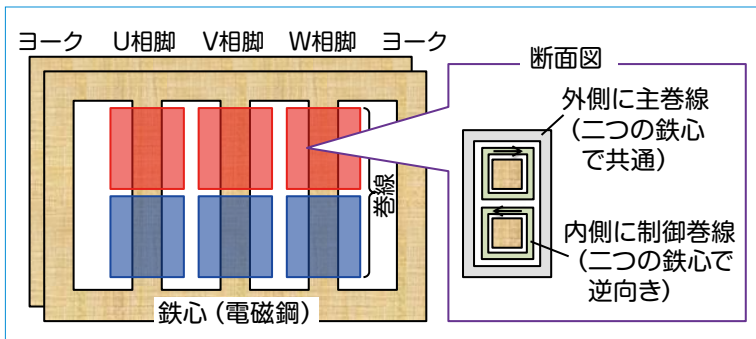


図7 開発した可変リアクトルの構成

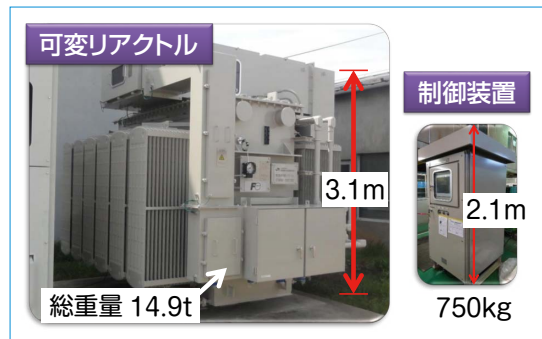


図9 可変リアクトルおよび制御装置（試作器）

用の三相変圧器の製造ラインで製作可能な二重五脚鉄心（独立した五脚鉄心が前後二つ重なった構造）という構造が提案されています<sup>7)</sup>。田形磁路に対して構造は大きく異なりますが、得られる電気的特性は同じです。



図8 可変リアクトル試作器の本体

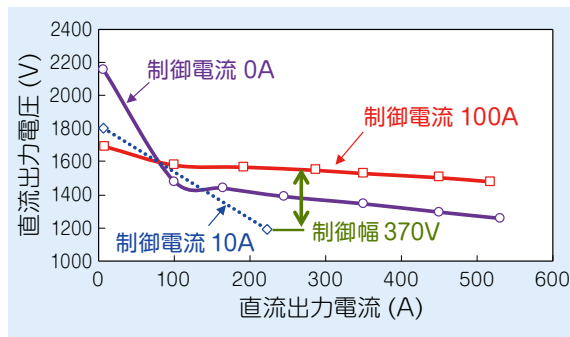


図10 試作器による電圧制御性能の確認結果

図7に可変電圧整流器用に開発した可変リアクトルの構成を示します。二重五脚鉄心を採用し、内側に制御巻線、外側に主巻線を配置する構成です。

鉄道固有の課題である数千アンペアの大電流の通電や、5万アンペアに達する大きな故障電流などに対応するため、機器構成および設計法を新規開発しました<sup>4)</sup>。

### 試作器による機能確認

#### 製作した試作器

可変リアクトルおよび制御装置の試作器を用いて、可変電圧整流器の機能確認を行いました。整流器の直流出力側で電圧1500V、電流500Aを目標として、鉄道事業者の技術基準に適合するように設計・製作をしました。直流出

力電圧の制御幅の設計値は約400Vです。

試作器の可変リアクトル本体の写真を図8に、制御装置を含めた試作器全体の完成写真を図9に示します。可変リアクトル本体は図9左側の機器タンク内に格納されています。

#### 電圧制御機能の確認結果

鉄道総研内において、試作した可変リアクトルと制御装置を既存の整流器用変圧器と整流器に接続して可変電圧整流器を構成し（図3参照）、試験線で実際に試験電車を走行させることで、電圧制御機能を確認しました。

図10に整流器の直流出力の電圧と電流の特性測定結果を示します。制御電流を変化させることで、ほぼ設計通りの制御幅370Vで電圧を制御できることを確認しました。図4 (b) と異なる

り制御電流が10Aの場合に最も電圧が低くなる結果となりました。これは着磁<sup>ちやくじ</sup>という一種の記憶効果が引き起こしたものと推定されますが、電圧制御機能の実現には問題となりません。

#### おわりに

ダイオード整流器に可変リアクトルを付加することで、直流変電所の出力電圧を制御可能な可変電圧整流器を開発しました。電圧制御幅400Vの試作器を設計・製作し、期待通りの電圧制御機能を得られることを確認しました。

今後は実用化に向けた機器設計の最適化を進め、直流電気鉄道の省エネルギー化に対する検討をさらに進めていく予定です。RRR

#### 文献

- 1) 電気鉄道ハンドブック編集委員会編：電気鉄道ハンドブック，コロナ社，2007
- 2) 塚本幹夫，末弘和夫，伊東利勝，阿部智：DCVRを使用した回生車対応の電圧制御の一考察，第2回鉄道電気技術研究発表会論文集，pp.75-79，1992
- 3) 曾根高真弓，金子利美：つくばエクスプレス用PWM変換装置の開発と実用化，鉄道と電気技術，Vol.16，No.12，pp.12-16，2005
- 4) 森田岳，彦坂知行，林田広和，加藤昌史：整流器用可変リアクトルの設計手法，鉄道総研報告，Vol.32，No.4，pp.11-16，2018
- 5) 大日向敬，一ノ倉理：電力用可変インダクタを用いた系統電圧調整装置の開発，電気設備学会誌，Vol.30，No.11，pp.881-884，2010
- 6) 前田満，大日向敬，葵木智之，赤塚重昭，川上峰夫，佐藤博道，一ノ倉理：田形磁路による可変インダクタの特性，電気学会論文誌B（電力・エネルギー部門誌），Vol.122，No.4，pp.561-570，2002
- 7) 彦坂知行，林田広和，川西敬造，有松健司，大日向敬：三相電磁機器，特許6437849，2018