

整流器用可変リアクトルの設計手法

森田 岳* 彦坂 知行** 林田 広和** 加藤 昌史**

Design Method of a Variable Inductor to be Used for a Rectifier at Railway Substations

Gaku MORITA Tomoyuki HIKOSAKA Hirokazu HAYASHIDA Masashi KATO

This paper describes a new voltage adjustment technique and its design method. A voltage compensator, which consists of a variable inductor and a control board, is connected between a transformer and a rectifier as a series compensator at the new technique. The voltage-drop induced by the variable inductor controls the DC output voltage of the rectifier. The control technique of the inductor is devised based on the core magnetic flux control technique which was originally developed by the Tohoku Electric Power Company. The authors developed a new structure of the variable inductor suitable for the railway application, with a focus on the six-phase AC and the large current capacity. A fast simulation method to be used for the designing of the inductor was developed based on the magnetic flux circuit theory and the non-linear simulation technique of ferromagnetic materials. A verification of the design and simulation method was carried out by comparing the measured and calculated data using a prototype variable inductor.

キーワード：直流き電システム，整流器，電圧制御，可変リアクトル，磁束制御，磁気回路，機器設計

1. はじめに

直流き電システムでは，電気車の運転状態すなわち力行や回生に応じて電圧を制御することで，回生電力の利用率の向上による省エネルギー化が期待できる^{1) 2)}。変電所でこの電圧制御実施を行う場合，現在最も普及しているダイオード整流器では，能動的な電圧制御が不可能である。これが可能な装置として，自励式整流器が既に実用化されている³⁾が，価格がダイオード整流器の10倍程度と高コストである。

そこで，付加機能を電圧制御が可能で，自励式整流器の1/5程度の価格となる新しい電圧制御技術として，ダイオード整流器に対して可変リアクトルと制御装置からなる電圧調整装置を追加した高機能整流器を開発した。本論文では，そのコア技術となる可変リアクトルの機器構成と設計手法について報告する。

2. 整流器回路構成と出力電圧制御

直流き電システムの電圧制御に関する既存先行技術の代表例と，今回開発した技術の特色について述べる。

2.1 ダイオード整流器

最も一般的に使用されている変換装置である。電力会社から受電した特別高圧あるいは高圧の三相交流を降圧

* 電力技術研究部 き電研究室

** 富士電機株式会社

する整流器用変圧器と，交流を直流に変成する整流器とを組み合わせられて構成される（表1左側）。

電圧降下は，軽負荷領域を除けば，ほぼ整流器用変圧器の短絡インピーダンス（漏れリアクタンスと巻線抵抗）と負荷電流の積で決まり，電流に対して垂下特性となる。制御可能な要素を持たないため堅牢で安価であるが，能動的な電圧制御は不可能である。

2.2 自励式整流器

自励式整流器（PWM変換整流器³⁾は，実用化された中では最も新しい電圧制御技術であり，整流器用変圧器とPWMコンバータから構成される（表1中央）。

高速の電圧制御に加えて，逆潮流（いわゆる回生インバータとしての動作），力率・波形の制御（SVCやアクティブフィルタとしての動作）も可能という特長を有する。一方，構成装置が全て特殊品となるため高価格である。さらに，半導体スイッチは短絡電流通電に耐える定格が必要となる。

自励式整流器の類似技術としてサイリスタ整流器や，ダイオード整流器とサイリスタ整流器を直列接続した構成の直流き電電圧補償装置DCVR（DC feeding Voltage Regulator）²⁾等が実用化されたが，半導体の技術革新等により，これらは生産中止となっている。

2.3 開発方式

今回開発した電圧制御方式（表1右側）は自励式整流器の機能のうち，電圧制御のみを実現し，逆潮流，力率

表1 整流器構成の比較

方式	ダイオード整流器	自励式整流器	高性能整流器
機器構成			
電圧調整	不可	可	可
逆潮流	不可	可	不可
力率制御	不可	可	不可
スイッチング	なし	主回路	制御回路(主回路と直交)
既存設備活用	—	不可(全て専用設備)	可(改修は要)
大凡の価格	1(基準)	10	1.5~2
位置付け	現行の標準	実用の最新技術	今回開発の制御技術

制御など他の機能を省略することで、低コスト化を図ると共に、普及を念頭に既設のダイオード整流器への追加導入も可能とすることを前提に検討を行った。主回路と半導体スイッチを有する制御回路が電磁的に直交するため(詳細は後述)、半導体スイッチは主回路側の短絡故障に対応する必要がない点も利点である。

回路構成は、整流器用変圧器の二次側と整流器の一次側との間に可変リアクトルを接続した構成である。自励式整流器やDCVR等の従来の電圧制御技術は、直流出力電圧を直接制御対象とするが(図1(a))、本方式は可変リアクトルのインダクタンスを制御することで、整流器用変圧器の見かけ上の漏れリアクタンスを増加させ、整流器の電圧低下特性を調整して(同図(b))、間接的に出力電圧を制御する。

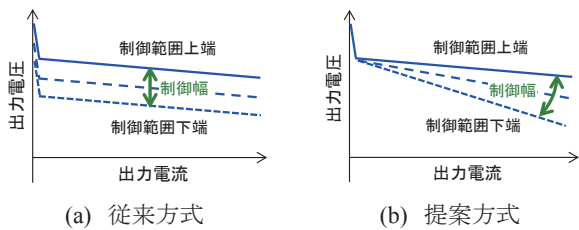


図1 電圧制御技術による制御特性の差異

3. 可変リアクトルの機器構成

3.1 基礎技術

今回開発の電圧制御技術の中核となる可変リアクトルには磁束制御方式を採用した。この磁束制御は東北電力の特許技術^{4) 5) 6)}であり、鉄心材料である電磁鋼の非線形磁化特性を積極的に利用する制御方法である。類似の技術として磁気増幅器⁷⁾があり、二つの可飽和変圧器を組み合わせる単相リアクトルを構成するが、磁束制御方式では単一のリアクトルで同等機能を実現可能である。

3.1.1 田形磁路

本技術による単相可変リアクトルの基本構成は田形磁

路(図2)⁴⁾である。田形の鉄心材料は電磁鋼であり、主回路電流(交流)を通電する主巻線に加え、制御電流(直流)を通電する制御巻線を設ける。変圧器と異なり、制御巻線による磁束は全く主巻線と鎖交せず、主巻線による磁束は二分割された制御巻線に逆位相で鎖交するため、主巻線と制御巻線は電磁的に直交する。

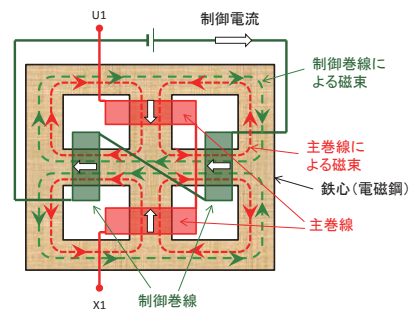


図2 田形磁路による可変リアクトルの構成

3.1.2 インダクタンス制御原理

鉄心は非線形磁化特性(典型的には図3に示す黒色線の磁界の強さ H と磁束密度 B を変数とする特性)を持ち、主巻線に交流を通電すると同図(a)の青色線に示すヒステリシス曲線に沿って鉄心内に磁束が生じる。ここで制御巻線に直流を通電し、鉄心の各部の起磁力(磁界の強さ)に直流バイアスを印加すると、動作領域が一方にシフト(直流偏磁)し、同図(b)の赤線で示すように交流の正極性期間が飽和領域に入るため、生じる磁束の振幅は減少する。

この磁気飽和現象は鉄心各部で様相が異なる(図4)。交流の正極性期間では、鉄心の左側で制御巻線と主巻線の起磁力が同位相となり磁気飽和するが、負極性期間では右側が磁気飽和する。これにより、制御電流を通電しない場合に比べ鉄心の有効断面積が減少し、インダクタンスが減少する。さらに、正負期間が対称の現象であるため、交流正負期間の対称性が保たれる特長がある。

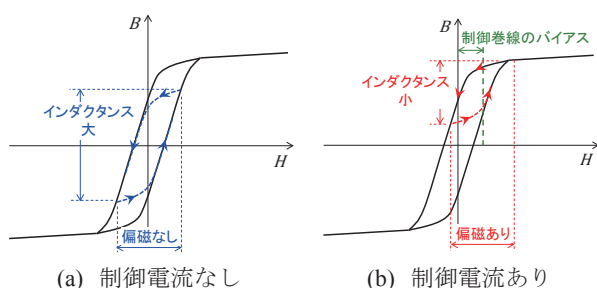


図3 制御電流による鉄心動作領域の変化

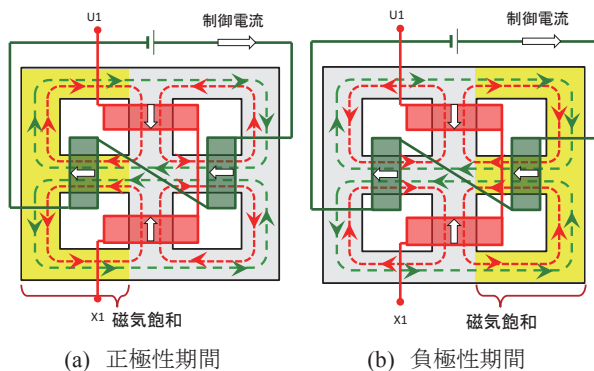


図4 田形磁路における磁気飽和現象

3.1.3 二重五脚鉄心

田形磁路は鉄心構造が特殊で、単相器であり多相交流では相毎に可変リアクトルが必要となるため、三相器に適した図5に示す二重五脚鉄心構造⁵⁾が提案されている。本構造は電氣的には田形磁路と同一であるが、前後二つの五脚鉄心（汎用技術）と、三相の主巻線と直流の制御巻線が設けられる。通常の変圧器と同様の構造で、制御巻線と主巻線は鉄心を共有するが、前後鉄心で制御巻線の位相を逆転することで、主巻線と電磁的に直交化する。主巻線は前後鉄心に共通して巻かれる。

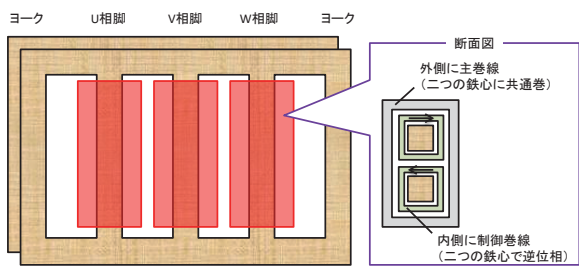


図5 二重五脚鉄心による可変リアクトルの構成

3.2 開発した可変リアクトルの構成

3.2.1 鉄道応用における課題

東北電力が開発を進める磁束制御形可変リアクトル⁶⁾は、三相高圧配電線用の無効電力補償を目的とするものである。鉄道の整流器用への適用では以下の課題に対応する必要があり、今回開発ではこれに適した新たな機器構成と設計法を検討・開発した。

(1) 直列リアクトルである点

前記東北電力の開発機器は並列補償装置であり、分路リアクトルとして電路に接続され、正弦波電圧駆動で設計される機器である。一方、今回の用途は直列リアクトルであり、電路に直列接続されるため電流源駆動で設計すべき機器となる。また、電流も歪み波形となる。

(2) 六相交流を通電する点

ダイオード整流器の主流は12パルス方式であり、整流器用変圧器の二次側は六相交流（30度位相の異なる三相交流の組み合わせ）となる。これを三相器2台で構成する場合、コストと設置スペースの増大に繋がる。

(3) 大電流・過負荷電流を通電する点

東北電力の開発機器の電流定格（主巻線）は数十Aであるが、ダイオード整流器の場合、定格電流が数千Aのオーダーとなる。さらに、短時間過負荷として300%程度までを保証する鉄道固有の仕様に対応する必要がある。

(4) 大きな短絡電流に耐える必要がある点

今回開発の機器は直列リアクトルであるため、直流側で生じる可能性のある大きな短絡電流（最大50kA程度）に耐える必要がある。

3.2.2 機器構成

開発した整流器用可変リアクトルの構成を図6に示す。鉄心構成は前述の二重五脚鉄心とし、主巻線と制御巻線も電磁的に直交とした。一方、六相交流を1台の機器に收容するため、主巻線は変圧器の特殊結線である千鳥結線⁸⁾を応用し、直列結線と千鳥結線の間の位相差が30度となるよう機器構成を設計した。

巻線設計を表2に示す。主巻線の直列結線（U1, V1, W1相）は巻数N、千鳥結線（U2, V2, W2相）は巻数 $2N/\sqrt{3}$ として、直列・千鳥の結線でインダクタンスが等しくなるように設計した。制御巻線（F1 - F2）は6本の脚に分割して設け、全て直列に接続し巻数 N_C である。

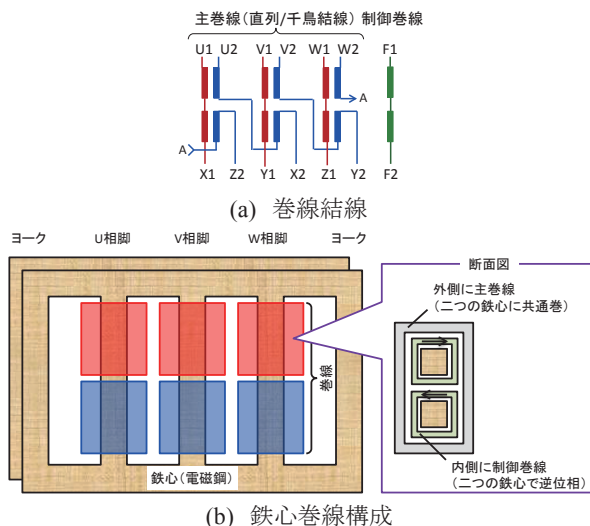


図6 開発した可変リアクトルの機器構成

特集：電力技術

磁気回路モデル（後述）を用いて計算した、主巻線の起磁力と鎖交磁束の複素平面表示（基本波成分のベクトル表示）を図7、図8に示す。ここで、 I_{U1} から I_{W2} は各主巻線の電流、 Φ_U から Φ_W は各脚の磁束（前後鉄心の和）である。起磁力は直列・千鳥の結線（図7の青と赤の矢印）で同一振幅・同位相となり、鎖交磁束（電圧降下に対応、図8の青と赤の矢印）は同一振幅・30度位相差となる。これより、直列・千鳥の結線でインダクタンスが等しく、同一の鉄心を共有できる。

鉄道固有の大電流・過負荷・短絡電流に対応するため、一般電力用リアクトルの規格（JEC-2210）に加え、鉄道固有となる整流器用変圧器の標準（JR社内規格）に準じた設計とした。

表2 巻線設計

巻線	位相	巻数
U1—X1	基準位相 (0°)	$N/2 \times 2$
V1—Y1	基準位相 (-120°)	$N/2 \times 2$
W1—Z1	基準位相 (-240°)	$N/2 \times 2$
U2—X2	30度進み位相 (30°)	$N/\sqrt{3} \times 2$
V2—Y2	30度進み位相 (-90°)	$N/\sqrt{3} \times 2$
W2—Z2	30度進み位相 (-210°)	$N/\sqrt{3} \times 2$
F1—F2	直流 (制御電流)	$N_C / 6 \times 6$

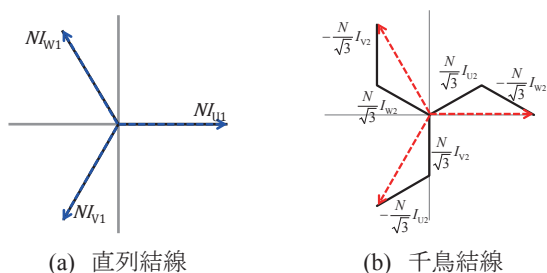


図7 主巻線による起磁力のベクトル表示

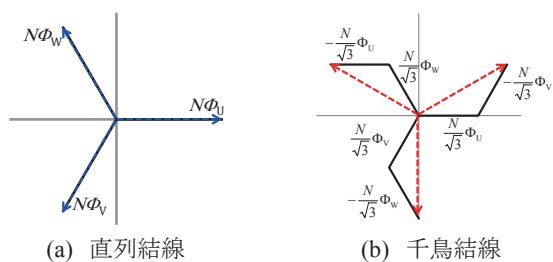


図8 主巻線鎖交磁束のベクトル表示

4. 可変リアクトルの解析技術

4.1 磁気回路解析

リアクトルに限らず変圧器や電動機等の電気機器の解析では、有限要素法（FEM）等によってMaxwell方程式の数値解を求める手法が一般的であるが、簡易な解析

手法とは言えない。すなわち、計算実施に必要な計算機資源と計算時間が膨大となり、十分な計算能力を有する計算機であっても、電源の一周期分の解析に数時間から数日必要な場合もある。

一方、磁束制御形の可変リアクトルに対する解析に磁気回路解析を適用し、実測との良好な一致が得られた実績が、東北大学より複数報告されており^{4) 9) 10)}、本開発でも磁気回路解析を採用した。

磁気回路解析とは、電力周波数のような低周波では電流と磁束に対する支配方程式が類似することを利用し、磁束の流れを磁気回路と見なし、Ohmの法則やKirchhoffの法則のような電気回路解析の手法を用いて計算する手法である。

電気機器の設計を手計算で行う場合、磁気回路解析は極めて強力な手法であるため、従来から一般的に用いられてきた^{7) 8)}。一方、近年の計算機を用いた設計でも、汎用の電気回路シミュレータによる解析が可能であり^{4) 9) 10)}、計算速度も一般に有限要素法等に比べ数倍～数十倍以上高速となる特長がある。

4.2 開発した解析手法

今回開発した解析手法は非線形の磁気回路解析を用いた、電気磁気連成解析である。機器設計への適用や整流器用変圧器や整流器等の電気回路との連成解析を考え、計算モデルの簡略化と計算速度向上を最優先として、以下のように簡略化した磁気回路モデルを用いた。

4.2.1 磁気回路モデル

東北大学のRNAモデル^{4) 9) 10)}では解析空間を多数要素に分割し、各要素を磁気回路の集中定数素子としてモデル化した三次元分布定数回路であり、空気領域をも含むことで計算要素数はさらに多数必要となる。

今回の開発では、変圧器やリアクトルの鉄心中磁束の変化は、脚や継鉄（脚相互を接続する鉄心の部分）の接続部で主に起こるという一般的現象に着目し、五脚鉄心（図6(b)参照）をU、V、Wの中央主脚、左右のヨーク、これらを接続する上部継鉄、下部継鉄の9ブロックに分割した集中定数回路（図9）でモデル化した。

ここで、 \mathcal{R} は各ブロックの磁気抵抗（添字アルファベットはブロック名、数値1は前側鉄心（2が後側鉄心）を表す）、 \mathcal{L} は磁気インダクタンス（添字は前と同様）、 I_C は制御電流である。磁気回路では巻線電流が起磁力（電気回路の電圧源に相当）となり、各主脚に巻かれた主巻線と制御巻線の起磁力が全て直列接続される。

空気領域については単純な磁気抵抗等でのモデル化は困難であり、磁気回路モデルでは気中磁路を無視した。代わりに漏れ磁界は電気回路側で直列のインダクタンスとして考慮する構成とした。

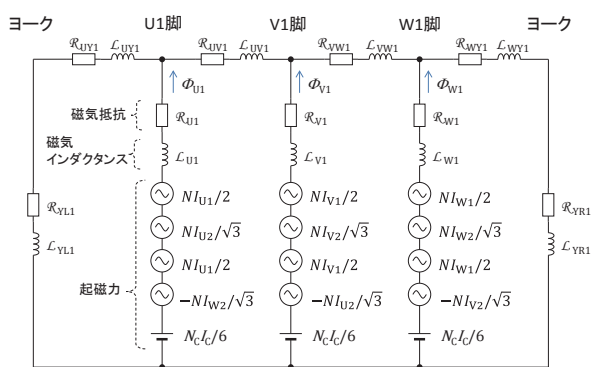


図9 五脚鉄心（前側）の磁気回路モデル

4.2.2 回路定数

本可変リアクトルは鉄心の磁気飽和現象を利用した機器であるため、この非線形磁化特性を正確にモデル化する必要がある。

(1) 磁気抵抗

磁束の流れにくさを表す磁気抵抗 \mathcal{R} は、非線形抵抗とし流れる磁束の関数とした。鉄心中の磁束は一様に流れると近似した。具体的には起磁力と磁束の比として式(1)で定義する。

$$\mathcal{R} = \frac{H\ell}{B(H)S} \quad (1)$$

ここで、 H は磁界の強さ、 B は磁束密度、 ℓ, S は鉄心の平均磁路長と有効断面積である。 $B-H$ 特性は鉄心材料の電磁鋼板の直流磁化特性から得られ、特殊な近似関数は用いず多点直線接続でモデル化した。

主脚鉄心の磁気抵抗の例を図10（青線）に示す。磁束の増加に伴い磁気飽和により急激に増大する特性となる。

(2) 磁気インダクタンス

電磁鋼板の鉄損（ヒステリシス損失と渦電流損失）のモデル化には、東北大学提案の磁気インダクタンス（磁束の変化を妨げる要素）を用いる手法^{9) 10)}を応用し、非線形素子 \mathcal{L} として式(2)でモデル化した。

$$\mathcal{L} = \frac{P_i(B_m)}{(\omega BS)^2} \quad (2)$$

ここで、 P_i は角周波数 ω における鉄心の鉄損であり、電磁鋼板の鉄損曲線から磁束密度の振幅 B_m の関数として得られる。磁気インダクタンスも多点直線接続として

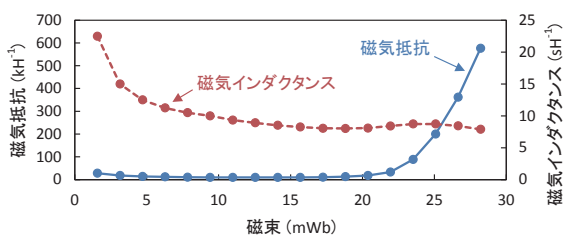


図10 磁気抵抗・磁気インダクタンスの例

モデル化した。本式から分かるように磁気インダクタンスは、角周波数と定常振幅に依存するため、高調波や過渡現象の解析には適用できない。

磁気インダクタンスの一例を図10（赤線）に示す。磁束の増加に伴い緩やかに低下する特性となるが、磁気抵抗に比べてその変動幅は小さい。

4.2.3 ソルバーと計算時間

磁気回路解析のソルバーには、電力中央研究所のXTAP 2.01を用いた。ただし、本計算手法は他の汎用電気回路シミュレータでも同様に実装・解析が可能である。

一般的なパーソナルコンピュータで可変リアクトルの電磁界解析を電源周波数10周期程度で行う場合、有限要素法では数日の計算時間が必要であるが、本手法では数秒～数十秒で十分である。

5. 可変リアクトルの設計法

可変リアクトルのインダクタンス（すなわち整流器の電圧低下率）は、主巻線電流（すなわち整流器の直流出力電流）にも依存する（図13参照）。鉄心断面積を増大して機器の設計磁束密度を小さくすれば、この依存性は低減し図1（b）に近い特性となるが、回生電力向上において重要な軽負荷領域の電圧制御幅が犠牲となる上、機器の大型化と高価格化に繋がる。

そこで、逆に設計磁束密度をさらに上げ、主巻線の軽負荷領域（100A～1000A程度）で飽和させる条件で前記解析を行ったところ、軽負荷領域から重負荷領域（例えば定格の300%）まで、ほぼ同一の電圧制御幅を有する適切な制御特性が得られることが分かった（図11）。

鉄心の動作領域を図12に示す。図中の I_{DC} は直流出力電流、 λ は鉄心の磁路長、 B_{SAT} は飽和磁束密度である。軽負荷時を除けば本機器は常に磁気飽和領域で動作し、制御電流により動作原点が移動することで、主巻線の電圧降下が変化する。これから可変リアクトルの電圧制御幅は、鉄心の飽和磁束密度（物性値）と有効断面積、主巻線の巻数の積で概略設計できることが分かる。

6. 設計・計算手法の検証

回路電圧1200V・定格390A（直流出力電流500Aに相当）、電圧制御幅約400Vの可変リアクトルを設計・試作した。これを用いて設計・計算手法の妥当性を検証した。図13（a）に制御電流をパラメータとする主巻線インダクタンスについて、計算値と測定値を示す。

制御電流0Aでは両者は良く一致しているが、制御電流50Aと100Aでは主巻線電流300A以下の領域で若干の誤差が認められる。これは制御巻線に比べ主巻線の起磁力が小さい領域で、空気領域への漏れ磁界が増大して

特集：電力技術

磁束が図9と異なる経路を流れるためである。ただし、これは実際のインダクタンス制御幅が計算よりも大きくなる安全側の誤差であるため、機器設計においては十分な解析手法と言える。

また、整流器用変圧器・整流器と組み合わせ、高性能整流器として運転した場合（表1参照）の直流出力の最大電圧制御幅（計算値）も設計通り400V程度となり、本設計手法の妥当性が確認された（図13（b））。

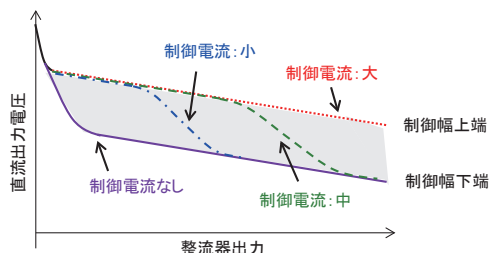


図11 高性能整流器の電圧制御特性

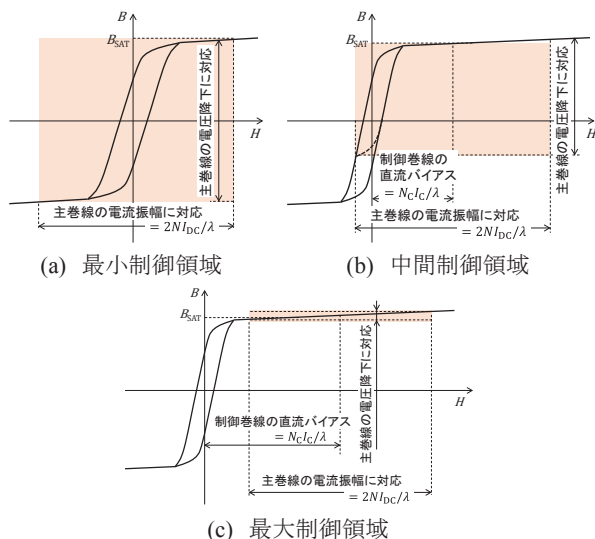
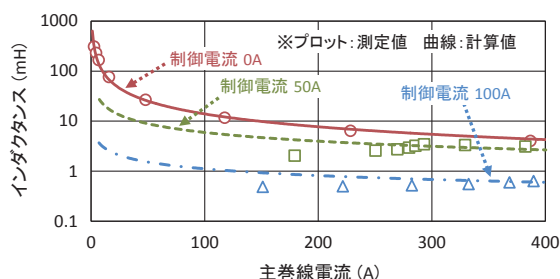


図12 リアクトル鉄心の動作領域（軽負荷を除く）

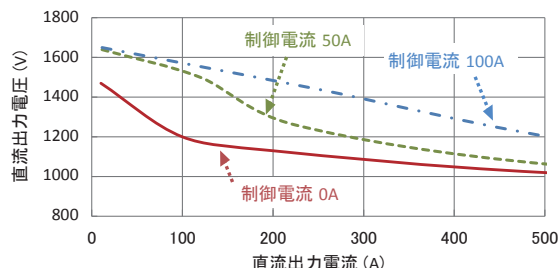
7. まとめ

新しい直流き電圧制御方式に適用する可変リアクトルの解析・設計技術を開発した。以下にまとめる。

- (1) 可変リアクトルは二重五脚鉄心構成の磁束制御方式とし、六相交流や過負荷等の鉄道固有の課題に対応した機器構成とした。
- (2) 非線形磁気回路を用いた簡易で高速な解析技術を開発した。
- (3) 適切に設計すれば軽負荷領域から重負荷領域まで、一定した電圧制御幅が得られ、その幅は飽和磁束と主巻線の巻数で設計できることが分かった。
- (4) 電圧制御幅約400Vの可変リアクトルを試作し、実測との比較により設計と計算手法の妥当性を確認した。



(a) インダクタンス



(b) 整流器の直流出力電圧（計算値）

図13 実測との比較による解析手法検証

謝辞

本開発にあたって御協力頂いた、東北電力 研究開発センターの大日向氏、有松氏、猪股氏にお礼申し上げます。

文献

- 1) 電気鉄道ハンドブック, コロナ社, 2007
- 2) 塚本, 未弘, 伊東, 阿部: 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, 日本鉄道電気技術協会, 1992
- 3) 曾根高, 金子: 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, 平成17年12月, pp. 12-16, 日本鉄道電気技術協会, 2005
- 4) 前田, 大日向, 葵木, 赤塚, 川上, 佐藤, 一ノ倉: 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, Vol. 122, No. 4, pp. 561-570, 2008
- 5) 彦坂, 林田, 川西, 有松, 大日向: 三相電磁機器, 公開特許公報, 特開 2016-162924, 2015
- 6) 大日向, 一ノ倉: 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
- 7) 野中: 電気機器 [II], pp. 183-195, 森北出版, 1971
- 8) 野中: 電気機器 [I], pp. 63-73, 森北出版, 1973
- 9) 吉田, 中村, 一ノ倉: 鉄損を考慮した三次元非線形磁気回路によるフェライト直交磁心形可変インダクタの特性算定, 電学論 D, Vol. 123, No. 4, pp. 386-391, 電気学会, 2003
- 10) 藤田, 中村, 一ノ倉: 磁気回路における異常渦電流損の考慮, 日本磁気応用学会誌, Vol. 37, No. 2, pp. 44-47, 2013