空心直流リアクトルのインダクタンスの非線形特性

正員 池田 正己 (九州工大) 正員 井坂 進 (東芝) 正員 坂倉 修 (東芝)
正員 吉田 良男 (関西電力) 正員 中越 吉彦 (四国電力) 正員 畑野 雅幸 (電源開発)

Non-linear Characteristics of the Inductance of Air-core Type DC Reactors.

Masami Ikeda, Member (Kyushu Institute of Technology),
Susumu Isaka, Member, Osamu Sakakura, Member (Toshiba Corp.),
Yoshio Yoshida, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.),
Yoshihiko Nakagoshi, Member (Shikoku Electric Power Co., Inc.),
Masayuki Hatano, Member (Electric Power Development Co., Ltd.),

DC reactors in HVDC transmission line are used to smooth the current containing many harmonics. They are also expected to suppress the large fault current to protect converter electronic devices such as thyristor valves. The inductance of air-core type DC reactors with magnetic shields has to be linear up to the large current region to perform its role. But the inductance decreases as the current increases because of the magnetic saturation phenomena of magnetic shields. The inductance of DC reactors is defined as the incremental value of the magnetic flux to the current and could be measured by applying small a. c. current superimposed on large d. c. current. Such a measurement is usually very difficult on account of testing facilities. This paper shows the non-linear characteristic of the inductance of DC reactors through the numerical analysis by three and two dimensional Finite Element Methods.

キーワード: 直流リアクトル, インダクタンス, 非線形解析, 有限要素法

1. まえがき

四国橋湾火力発電所の発生電力を関西方面に送電する紀伊水道プロジェクトが、2,000年の運転開始を目指して推進中で⁽¹⁾、現在建設工事が進められている。直流送電は異種系統間の接続、電力の潮流制御が容易であり、電力系統の安定化に寄与するところが大きく、交流電力系統を補完する形をとりながら急速に発展してきている。

直流リアクトルは送電線に直列に接続されており、その主たる役目は送電線に流れる電流を平滑することにある。変換器により交流電流から変換された直流電流には多くの高調波電流を含み脈動電流となるため、常時はこれを平滑するために直流リアクトルが用いられる。また、地絡等の事故時あるいは転流失敗時に流れる過大な電流を抑制する役目も有する。リアクトルには空心形とギャップ付鉄心形があるが、ギャップ付鉄心形は鉄心飽和領域でインダクタンスが大幅に低下するため、直流リアクトルには空心形が一般に採用されている。しかしながら直流送電用の直流リアクトルは空心形ではあるが、通常磁束の周囲への漏れ防止のために巻線の周囲に磁気シールドが配置されている。

そのため、空心形のリアクトルでもギャップ付鉄心形ほどではないが、磁気シールド内磁束密度が飽和磁束密度を超えるとインダクタンスが低下する。これを回避するには磁気シールドの有効断面積を大きくすればよいが、機器が大形化し、重量も増加する。従って、直流リアクトルとしては、要求されるインダクタンスの直線性を確保できる程度に磁気シールドの小形軽量化を図ることが望ましい。

直流リアクトルのインダクタンスは、所定の直流電流を通電した状態で微小な交流電流を重畳して測定することが理想的であるが、試験装置が極めて大掛りなものが必要となり、一般には試験設備能力上困難である。

そこで、近年電力機器への適用が実務的なレベルで可能になってきた三次元有限要素法に基づく数値解析により直流リアクトルの非線形磁気特性の把握を試みた。その結果直流リアクトルのインダクタンスの直線性は、現在の設計法に従えば十分確保できることが明らかになった。ここにその内容を紹介する。

2. 直流リアクトルのインダクタンス

交流系統に使用される分路リアクトル等のインダクタン

スは、巻線との鎖交磁束を ϕ 、巻線に流れる電流を I とすればインダクタンス L は(1)式で表される。

$$L = \frac{\phi}{I} \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、 $\phi - I$ 特性曲線においてインダクタンスは原点から特性曲線上の点を結んだ直線の傾きに等しい。

一方直流リアクトルのインダクタンスとしてはその機能上流れている直流電流に対する $\phi - I$ 特性上の点における電流変化分に対する磁束の変化量として見なすことができる。すなわち図1に示す $\phi - I$ 特性曲線における接線の傾きが直流リアクトルのインダクタンスであり、増分インダクタンス⁽²⁾あるいは微分インダクタンスとも言える。

図1 直流リアクトルのインダクタンス
Fig.1. Inductance of DC reactors.

従って、直流リアクトルの微分インダクタンスは(2)式によって求められる。

$$L = \frac{\Delta \phi}{\Delta I} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\Delta \phi$ は所定の直流電流が流れている状態で巻線端子に微小交流電圧 ΔV を印加した時の巻線との鎖交磁束を、 ΔI は巻線に流れる交流電流を表し、 ΔV を使って(3)式で表すことができる。

$$L = K \frac{\Delta V}{\Delta I} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $K=1/(2 \pi f)$
 f : 交流電流の周波数

3. インダクタンスの三次元磁界解析による算出

<3.1> インダクタンスの算出 解析により直流電流に微小交流電流が重畳した場合の直流リアクトルのインダクタンスを求めることは困難であるので、その非線形特性を次の手順により求めた。

- ・三次元磁界解析により磁気エネルギーを算出
- ・磁気エネルギーからインダクタンスを算出

- ・電流をパラメータに大電流領域まで各電流に対するインダクタンスを算出
- ・電流-インダクタンス特性から $\phi - I$ 特性を多項式近似して求め、その特性式を微分することにより各電流値における微分インダクタンスの値を算出

始めに三次元磁界解析により磁気エネルギーを求めるのであるが、この解析には有限要素法に基づく汎用プログラムを使用し、非線形解析にあたっては、鉄心・クランプ等の強磁性体にはそれぞれ直流磁化特性を折れ線近似により与えた。磁気エネルギー W_m からのインダクタンスの算出は(4)式により求めた。

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 \dots\dots\dots (4)$$

<3.2> リアクトルの解析方法

解析対象の直流リアクトルの定格は DC500kV-466.7A-6H とした。その構造は円筒状の巻線の外側を取り囲むように方向性けい素鋼板を積層した磁気シールドを配置している。図2 (a)はこのリアクトル中身をタンクに収納した状態を示し、図2 (b)の磁気シールドの側脚側(矢印Aの方向)からみた時の断面図である。

磁界解析は、図2 (b)に示すように構造的に前後と左右がそれぞれ対称であることから空間全体の4分の1とした。

図2 直流リアクトル断面図と三次元磁界解析領域
Fig.2. Side view of cross section of DC reactor and magnetic field analysis area.

また個々の部品のモデル化は次のようにした。

- ・磁気シールドのヨークと側脚部
 比透磁率：積層面方向…方向性けい素鋼帯の直流磁化特性を与え、また圧延方向と圧延直角方向を区別した。
 積層方向…30 (≒ 1 / (1 - 占有率))
- ・磁気シールド接合部 (コーナー部、90度ラップ接合)
 比透磁率：積層面方向…圧延方向と圧延直角方向の平均値を採用した。
- ・クランプ
 比透磁率：等方性で、軟鋼の直流磁化特性を折線近似した。

- ・タンクおよびタンク磁気シールド：解析の複雑化を避けるため多数個のタンク磁気シールドを省略し、代わりにタンクの磁化特性を磁気シールドの磁化特性に合わせた。

なお、本解析においては Reduce 法⁽³⁾を用いているため巻線は一般の要素分割とは別に巻線要素として入力している。

境界条件としては、領域を大きくとることによって自然境界とした。また、通電電流は設計上磁気シールドが定格電流の2倍のとき飽和するように初期設定した。

図3に三次元磁界解析におけるソリッドモデル（図2(b)の矢印Bの方向からの斜視図）を示す。

＜3.3＞ 解析結果 通電電流の大きさを定格電流から次第に大きくした場合の磁気シールド積層中央断面位置（図2(b)断面OQ）における磁束分布の変化の様子を図4、5に示す。図4～図5(a)～(d)はそれぞれ定格電流の大きさを1 puとした場合の1, 2, 3, 5, 10puにおける磁束分布を示す。図中の三角ベクトルの大きさが相対的な磁束密度の大きさを表している。

図4に示す定格電流時の磁束分布では、磁束が磁気シールドの中を通り易く、積層中央位置では巻線内部の磁束密度

図3 解析ソリッドモデル

Fig.3. Solid model of analysis.

度よりも大きくなっている。図4、5において、電流が大きくなるにつれて巻線の中の磁束密度が磁気シールド内の磁束密度と同程度の大きさになり、磁気シールドの飽和現象現れてくる様子がわかる。さらに電流が大きくなると、図5(d)に示すように磁束は磁気シールドの中を流れにくくなり、巻線の中の磁束密度の方が大きくなる。

なお、これらの磁束分布図においては磁気シールドの占積率は考慮せずに解析しているため、インダクタンスに対応する電流の大きさとしては通電電流に占積率を乗じて求めた。

図4 定格電流時磁束分布図

Fig.4. Magnetic flux distribution at rated current (1pu).

磁界解析で得られた磁気エネルギーからインダクタンスを(4)式より求め、1.8puの電流（実器での裕度最終規定最大電流値）で磁気シールドが飽和する状態となるように電流を換算（1.8/2.0 倍）した結果を図6に示す。なお、図中インダクタンスは1 pu 電流のときの値6.01 Hを100%として表示している。

図6に示された特性から $\phi - I$ 特性を多項式近似して求め、微分インダクタンスとして(2)式により求めたものを図7に示す。図6より、インダクタンスとして単に磁束を電流値で除して求めたものは2 puの電流までほとんど低下しないのに対し、微分インダクタンスは図7に見られるように、電流の増加に対するインダクタンスの低下が大きい。しかしながら1.8puの電流における微分インダクタンスの値は定格電流時のその95.6%であり、直流リアクトルに要求されるインダクタンスの直線性の裕度が1.8pu電流の時10%であれば、十分許容できるレベルと見ることができ。もし直線性の裕度が5%ならば磁気シールドの設計磁束密度を下げる必要が出てくる。

文献(4)に見られる同じタイプの小形モデルの測定では、巻線のみでの値が2%程度異なるが、磁気シールドの飽和点と見られる1.5pu電流でのインダクタンスは定格時の約95%となっている。1.8pu電流で磁気シールドが飽和する条件に換算した状態では上記定格電流は1.2pu電流に相当し、1 pu電流時の94%程度になると推定され、本解析モデルでの結果と比較的よく一致している。三次元磁界解析からのインダクタンス算出手法の有効性が示唆される。

(a) 2 pu 電流

(b) 3 pu 電流

(c) 5 pu 電流

(d) 10pu 電流

図5 過電流時磁束分布図

Fig. 5. Magnetic flux distributions at over rated currents.

図6 インダクタンスの電流特性 ((1)式による)

Fig. 6. Inductance defined by eq. (1).

図7 微分インダクタンスの電流特性 ((2)式による)

Fig. 7. Differential Inductance defined by eq. (2).

4. 二次元（軸対称三次元）磁界解析によるインダクタンスの算出

三次元の磁界解析は実際の構造に合わせて行なうことができるが、入力データの作成の容易さ、要素分割の細かさ、計算時間の短さなどの点では二次元（軸対称三次元）解析の方が使い易い。そこで、二次元磁界解析による直流リアクトルの非線形特性の算出を試みた。

＜4.1＞ 解析方法 解析モデルとして、図2(b)における断面OQ側で近似した場合、巻線全体が磁気シールドで覆われてしまい、タンクおよびタンク磁気シールドを構造的にモデル化することができない。そこで、側脚側から見た断面OPとした。この場合、上下のヨークに入射した磁束の流れ道がなくなるが、インダクタンスの大部分は巻線の比較的近傍領域の磁気エネルギーによることから、図8に示すように水平方向のヨークを、解析では側脚部の長さも含めて上下方向に伸ばし境界面を自然境界として磁束が流れるようにした。こうすることにより磁気シールドの飽和現象が模擬できる。なおこのヨーク（側脚）の断面積は2 pu 電流で飽和磁束密度になるように設定した。

＜4.2＞ 解析条件 各構造材の磁化特性については、磁気シールドは等方性とし、方向性けい素鋼帯の圧延方向の直流磁化特性を与え、タンク磁気シールドも半径方向（積層方向）の比透磁率を30とした以外は同じ扱いとした。タンクには軟鋼の磁化特性を等方性で与えた。

＜4.3＞ 解析結果 図9に電流の大きさを変えたときの磁束分布の変化を示す。3 pu 電流時でも巻線のみ磁束分布に近づいているが、10pu 電流になると巻線のみ磁束分布に一層近くなる様子がわかる。二次元磁界解析から得られる磁気エネルギーから三次元解析の場合と同じ手順により微分インダクタンスを求め、電流を磁気シールドの磁束密度が1.8pu 電流で飽和磁束密度となるように換算して表示したものを図10に示す。図中インダクタンスは1 pu 電流時の6.08 Hを100%として表示している。インダクタンスの直線性は三次元解析の場合よりも若干悪く1.8pu 電流

では定格電流時の約94%である。空心リアクトルのインダクタンスは巻線部および巻線近傍空間の磁気エネルギーによるところが大きいことから、二次元解析によっても三次元解析に対して大きな違いが出なかったと考えられる。

図9 二次元磁束分布図

Fig. 9. Two dimensional magnetic flux distributions.

図8 二次元磁界解析モデル

Fig. 8. Two dimensional analysis model.

図10 微分インダクタンスの電流特性（二次元）

Fig.10. Differential inductance by two dimensional analysis.

5. 大容量直流リアクトルの磁化特性の測定

＜5.1＞ 実例 紀伊水道直流連系設備用直流リアクトルを2台A, B器を完成させた。その諸元を表1に示す。前章までの基本的な解析は6巻線並列構成の1巻線分について行ったが、実製品は4巻線直列構成である。大容量変圧器やリアクトルでは同一定格でも製品毎に輸送、据付などの条件で分割数が異なることは普通である。従って、基本的なモデルで設計技術を確立し、それを一般化しているようなケースに対応できるようにする必要がある。

表1の3ケースは磁気シールドの磁束密度、構造など個々に若干異なる設計となっている。

図11にB器の工場試験姿を示す。防音タンクに囲まれているこの写真では不明であるが、4分割タンクが直列に接続され、両端子に試験用ブッシングが接続されている。磁気エネルギーで比較した場合、世界最大容量の直流リアクトルである。

図11 DCリアクトルの工場試験姿
Fig.11. DC reactor under the factory test.

表1 大容量直流リアクトルの諸元
Table 1. Ratings and compositions of DC reactors.

		解析モデル	A器	B器
定格直流電圧			500 kV	
定格直流電流			2800 A	
定格インダクタンス			1 H	
定格短絡過電流			20 kA-2秒	
分割	タンク数	6	2	4
	コイル数	6 並列	4 直列	
	磁気シールド数	6	2	4
タンク磁気シールド			有	

＜5.2＞ 測定法 微分インダクタンスの測定は所定の直流電流を通電した状態で微小交流電流を重畳させて行なう方法が理想的であるが、容量が大きいものについては実施することが困難である。また各電流値毎にインダクタンス((1)式相当)を測定し、 $\phi-I$ 特性を多項式近似した後、微分処理する方法は測定誤差、ばらつきを考えた場合必ずしも信頼性が高いとは限らない。

ステップ状の直流電圧Vを巻線端子に印加した場合、巻線の抵抗をR、リアクトルのインダクタンスをL(I)とすれば次の関係式が成り立つ。

$$V = RI + L(I) \cdot dI/dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

両辺を積分すると、巻線に鎖交する磁束 ϕ は(6)式により求められる。

$$\phi = \int V dt - \int RI dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

この方法によれば、1回のみのステップ電圧の印加により電流Iに対する磁束 ϕ の連続的な非線形特性曲線を得ることができ、微分インダクタンスも容易に得ることができる。

測定は次のように行った。リアクトルの抵抗を考慮して仕様上の規定の直流電流を流せる直流電圧を印加し、電圧と電流の過渡値を電流が飽和するまでオシロスコープにより測定する⁽⁶⁾。VとRIを積分し、(6)式より ϕ を求めた後、最小自乗法により(7)式の近似式を求め、(8)式より微分インダクタンスを得る。

$$I = f(\phi) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$L = \frac{d\phi}{dI} = \frac{1}{\frac{dI}{d\phi}} = \frac{1}{\frac{df(\phi)}{d\phi}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、V, R, I 測定値, ϕ : (6)式による計算値

＜5.3＞ 測定結果 図12(a), (b)にA器における電流に対する磁束 ϕ と微分インダクタンス(設計値1Hに対する比(%))の測定結果を示す。表2に解析値とA, B器の設計値と測定値を示した。

ここで、A, B器の設計値とは解析結果の知見をもとに、＜3.3＞で述べた方法と同じ方法で個々の設計における磁気シールドの飽和を考慮して求めたものである。

表中の7.14pu 20kAは磁気シールドが完全に飽和したものととして求めた値であるが、測定は設備上不可能なので測定結果は示していない。

表2の結果に示すように、設計値と測定値の違いは3%以内であり、通常の仕様(1.25pu以下で-5%~+10%, 1.5~1.8puで±10%)の範囲に問題なく入っている。

図 12 A 器の磁束測定結果
Fig. 12. Measured results of "A" unit.

表 2 大容量直流リアクトルの微分インダクタンス
Table 2. Analysis and measurements of DC reactors.

電 流	解析モデル	A 器		B 器	
		設計値	実測値	設計値	実測値
0.1pu	280A	1.00H	1.01H	1.01H	1.02H
0.5	1400	1.01	1.03	1.03	1.04
1.0	2800	1.00	1.03	1.03	1.04
1.25	3500	0.99	1.02	1.03	1.03
1.5	4200	0.97	1.00	1.02	1.02
1.8	5040	0.95	0.98	1.00	1.01
7.14	20kA	0.82	0.88	0.86	—

6. ま と め

直流リアクトルの微分インダクタンスの電流特性を、三次元有限要素法を用いて非線形解析して求めた。その結果、磁気シールド飽和相当電流で 5% 程度の低下となる直線性が得られることがわかった。

また、二次元（軸対称三次元）磁界解析では、微分インダクタンスの低下が三次元の場合よりも若干大きいものの、その非線形特性の検討には有効であることがわかった。

世界最大容量の直流リアクトル 2 台について、インダクタンスの非直線性を測定し、三次元解析から確立した設計法による結果とよく一致することを確認した。

(平成 10 年 6 月 29 日受付、同 11 年 4 月 12 日再受付)

文 献

- (1)長谷川, 山地, 酒井:「紀伊水道直流連系設備計画」, 電気設備 H8-5
- (2)“Reactors”, IEC289, 1988.
- (3)J. Simkin and C. W. Trowbridge: “Three-dimensional nonlinear electromagnetic field computations using scalar potentials”, IEE Proc., Vol. 127, Pt. B, No. 6, 1980, pp. 368-374.

- (4)川越, 今滝, 東楨, 本田, 光庵:「ガス絶縁交直変換所用機器」, 三菱電機技報 Vol. 57, No. 10, 1983, pp. 19-20.
- (5)S. Calabro, F. Coppadoro and S. Crepaz, “The measurement of the Magnetization Characteristics of Large Power Transformers and Reactors through D.C. Excitation”, IEEE Trans. on PD, Vol. 1, PWRD-1, No. 4, 1986, pp. 224-234.

池田 正己 (正員) 1943 年 9 月 14 日生まれ。62 年神奈川工業高等学校卒業。同年 4 月(株)東芝入社。同社重電技術研究所にて高電圧技術開発を担当。82 年 10 月以来同社浜川崎工場変圧器部にて、電力用変圧器の開発設計などの業務に従事。99 年 5 月九州工業大学客員教授電気学会論文賞, 進歩賞, 工学博士(慶応大学)

井坂 進 (正員) 1950 年 8 月 20 日生まれ。1975 年 3 月名古屋大学大学院電気工学修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。主として、渦電流損などの磁界現象解析および電力用変圧器の開発設計に従事。

坂倉 修 (正員) 1954 年 4 月 5 日生まれ。1977 年 3 月慶應義塾大学電気工学科卒業。同年 4 月(株)東芝入社。主として、電力用変圧器の設計に従事。

吉田 良男 (正員) 1950 年 2 月 20 日生まれ。1968 年富山工業高校卒業。同年 4 月関西電力(株)入社。1976 年富山大学工学部卒業。現在、電力システム室大電力送電チーム課長。

中越 吉彦 (正員) 1956 年 11 月 23 日生まれ。1980 年 3 月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月四国電力(株)入社。主に変電建設工事業務に従事。現在、同社橋湾系統プロジェクトチーム副主査。

畑野 雅幸 (正員) 1961 年 4 月 2 日生まれ。1984 年 3 月北海道大学工学部電気工学科卒業。同年電源開発(株)入社。以来、交直変換設備の設計、技術検討、北本連系設備増設工事に従事。現在工務部変電グループ課長代理。