

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7328601号
(P7328601)

(45)発行日 令和5年8月17日(2023.8.17)

(24)登録日 令和5年8月8日(2023.8.8)

(51)国際特許分類 F I
G 0 1 R 27/26 (2006.01) G 0 1 R 27/26 L

請求項の数 8 (全13頁)

(21)出願番号	特願2022-569439(P2022-569439)	(73)特許権者	000003942 日新電機株式会社 京都府京都市右京区梅津高畝町4-7番地
(86)(22)出願日	令和2年12月17日(2020.12.17)	(74)代理人	110000338 弁理士法人 HARAKENZO WORLD PATENT & TRADE MARK
(86)国際出願番号	PCT/JP2020/047229	(72)発明者	前地 洋明 京都府京都市右京区梅津高畝町4-7番地 日新電機株式会社内
(87)国際公開番号	WO2022/130583	(72)発明者	桑田 稔 京都府京都市右京区梅津高畝町4-7番地 日新電機株式会社内
(87)国際公開日	令和4年6月23日(2022.6.23)	審査官	永井 皓喜
審査請求日	令和5年6月1日(2023.6.1)		
早期審査対象出願			

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 リアクトルの温度上昇試験方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

リアクトルの温度上昇試験方法であって、
 所定の電流値の基本波電流通電時の銅損と、それぞれ所定の電流値の所定の次数の高調波電流通電時のそれぞれの銅損とに基づいて、目標銅損を算出するステップと、
 前記基本波電流通電時の鉄損と、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損とに基づいて、目標鉄損を算出するステップと、
 前記目標銅損及び前記目標鉄損を与える電流の周波数及び電流値を、それぞれ試験周波数、試験電流値として算出するステップと、
 前記試験周波数、前記試験電流値を有する試験電流を前記リアクトルに通電し、前記リアクトルの所定箇所の温度が一定になるまで通ずるステップと、を備えた、リアクトルの温度上昇試験方法。

10

【請求項2】

前記基本波電流通電時の銅損、及び、それぞれの前記高調波電流通電時の銅損は、計算により予め求められる、請求項1に記載のリアクトルの温度上昇試験方法。

【請求項3】

所定の電流値の基本波電流を前記リアクトルに通電し、前記基本波電流通電時の損失を測定するステップと、
 それぞれ所定の電流値の前記所定の次数の高調波電流を前記リアクトルにそれぞれ通電し、それぞれの前記高調波電流通電時の損失を測定するステップと、を更に備え、

20

前記基本波電流通電時の鉄損は、前記基本波電流通電時の損失から前記基本波電流通電時の銅損を差し引いて求められ、

それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損は、それぞれの前記高調波電流通電時の損失からそれぞれの前記高調波電流通電時の銅損を差し引いて求められる、請求項 2 に記載のリアクトルの温度上昇試験方法。

【請求項 4】

前記目標銅損は、前記基本波電流通電時の銅損と、それぞれの前記高調波電流通電時の銅損の和として求められる、請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載のリアクトルの温度上昇試験方法。

【請求項 5】

前記目標鉄損は、前記基本波電流通電時の鉄損と、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損の和として求められる、請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載のリアクトルの温度上昇試験方法。

【請求項 6】

前記目標鉄損は、前記基本波電流通電時の鉄損と、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損の和に、1 以上の係数を乗じて求められる、請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載のリアクトルの温度上昇試験方法。

【請求項 7】

前記基本波電流の所定の電流値は、前記リアクトルの定格電流値である、請求項 1 から 6 のいずれか 1 項に記載のリアクトルの温度上昇試験方法。

【請求項 8】

選択された前記高調波電流の次数は 5 である、請求項 1 から 7 のいずれか 1 項に記載のリアクトルの温度上昇試験方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数の周波数の電流が流入するリアクトルの温度上昇試験方法に関する。

【背景技術】

【0002】

リアクトルの性能を試験する方法として様々な方法がある。その中で、使用時におけるリアクトルの温度上昇について試験をする温度上昇試験方法が、非特許文献 1 に記載されている。非特許文献 1 には、基本波電流に高調波電流が重畳されて流入する場合を模擬する試験として、以下の(1)または(2)の条件の通電を行うことが規定されている。

【0003】

ここで、許容電流種別 I の場合を例示する。(1) 定格周波数の定格電流に、基本波電流比 35% の第 5 調波含有率の第 5 調波電流を重畳して連続的にリアクトルに通電する(以下、従来試験 X と称する)。(2) リアクトルの損失が、後述の合計損失と等価となる基本波電流を連続的にリアクトルに通電する(以下、従来試験 Y と称する)。前記合計損失は、定格周波数の定格電流通電時のリアクトルの実測損失と、基本波電流比 35% の第 5 調波電流通電時のリアクトルの実測損失の和である。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【文献】日本産業標準調査会「JIS 高圧及び特別高圧進相コンデンサ並びに附属機器 - 第 2 部：直列リアクトル (JIS C 4902 - 2 : 2010)」

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

従来試験 X は、実使用状態に即した通電の状態が模擬できるものの、試験用回路において、基本波電源と高調波電源との間で互いに電流が混入する問題がある。電流の混入を避

10

20

30

40

50

けるための回路構成として、例えば、図 4 に示す回路を採用することが考えられる。しかし、図 4 に示す回路による試験は大がかりとなる問題がある。

【 0 0 0 6 】

従来試験 Y は、リアクトルの損失に含まれる銅損と鉄損の周波数依存性を反映せずに、合計損失を基本波電流のみで供給する。そのため、基本波と高調波とが重畳された状態における銅損と鉄損が正しく模擬されない問題がある。

【 0 0 0 7 】

本発明の一態様は、簡易な試験回路で実使用状態に即したリアクトルの温度上昇試験を実現することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 8 】

前記の課題を解決するために、本発明の一態様に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、所定の電流値の基本波電流通電時の銅損と、それぞれ所定の電流値の所定の次数の高調波電流通電時のそれぞれの銅損とに基づいて、目標銅損を算出するステップと、前記基本波電流通電時の鉄損と、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損とに基づいて、目標鉄損を算出するステップと、前記目標銅損及び前記目標鉄損を与える電流の周波数及び電流値を、それぞれ試験周波数、試験電流値として算出するステップと、前記試験周波数、前記試験電流値を有する試験電流を前記リアクトルに通電し、前記リアクトルの所定箇所の温度が一定になるまで通ずるステップと、を備えることを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 0 9 】

本発明の一態様によれば、簡易な試験回路で実使用状態に即したリアクトルの温度上昇試験を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 0 】

【図 1】本発明の実施形態 1 に係る温度上昇試験方法の試験回路を示す回路図である。

【図 2】従来試験 X、従来試験 Y、実施形態 1 及び実施形態 2 に係る温度上昇試験における通電時の各損失の例を比較して示す図表である。

【図 3】第 3 調波を含む歪波磁束のヒステリシス曲線の例を示す図である。

【図 4】従来試験 X を実施するための回路例を示す回路図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 1 】

〔実施形態 1〕

以下、本発明の実施形態 1 について詳細に説明する。進相コンデンサ用直列リアクトルや、いわゆる、フィルタ用リアクトルは、コンデンサと組み合わせて使用される。このように、コンデンサとリアクトルとを組み合わせて使用すると、リアクトルには基本波電流に加えて高調波電流も流れる。

【 0 0 1 2 】

本発明に係る温度上昇試験方法は、このように基本波電流に高調波電流が重畳される状態での温度上昇を模擬できるリアクトルの温度上昇試験方法である。また、リアクトルには、空芯式、磁気遮蔽空芯式、ギャップ付き鉄心式等、各種の方式がある。本発明に係る温度上昇試験方法は、主に電磁鋼板を使用して、巻線と鉄心で構成されるリアクトル（磁気遮蔽空芯式、ギャップ付き鉄心式）を対象としている。

【 0 0 1 3 】

<試験回路 100 の構成>

図 1 は、本発明の実施形態 1 に係る温度上昇試験方法の試験回路 100 を示す回路図である。図 1 に示すように、試験回路 100 は、周波数可変電源 E1 と、補償コンデンサ C1 と、供試リアクトル L1 と、を備えている。試験回路 100 は、供試リアクトル L1 の温度上昇試験を行う回路である。

【 0 0 1 4 】

10

20

30

40

50

周波数可変電源 E 1 は、周波数及び電流値が可変である。周波数可変電源 E 1 は、後述する試験周波数 f_{ex} 及び試験電流値 I_{ex} を有する試験電流を供試リアクトル L 1 に通電する。補償コンデンサ C 1 は、供試リアクトル L 1 に必要な電流を通電するための周波数可変電源 E 1 の電源容量を低減する。

【 0 0 1 5 】

< 温度上昇試験方法の流れ >

実施形態 1 に係る温度上昇試験方法の流れについて、図 1 及び図 2 を参照しつつ以下に説明する。図 2 は、従来試験 X、従来試験 Y、実施形態 1 及び実施形態 2 に係る温度上昇試験における通電時の各損失の例を比較して示す図表である。

【 0 0 1 6 】

周波数可変電源 E 1 により、所定の第 1 電流値 i_{21} の基本波電流を供試リアクトル L 1 に通電し、基本波電流通電時の供試リアクトル L 1 の損失（合計損失 W_{T21} ）を測定する（ステップ S 1）。第 1 電流値 i_{21} は、例えば、供試リアクトル L 1 の定格電流値である。

【 0 0 1 7 】

また、第 2 電流値 i_{22} の高調波電流を供試リアクトル L 1 に通電し、高調波電流通電時の損失（合計損失 W_{T22} ）を測定する（ステップ S 2）。高調波電流は、例えば、基本波の第 5 調波であり、基本波電流比 35% の電流値を有するものとすることができる。

【 0 0 1 8 】

次に、第 1 電流値 i_{21} の基本波電流通電時の銅損 W_{cu21} と、所定の第 2 電流値 i_{22} の高調波電流通電時の銅損 W_{cu22} とに基づいて、目標銅損 W_{cut} を算出する（ステップ S 3）。より具体的には、目標銅損 W_{cut} は、基本波電流通電時の銅損 W_{cu21} と、高調波電流通電時の銅損 W_{cu22} の和として求められる。

【 0 0 1 9 】

基本波電流通電時の銅損 W_{cu21} 及び高調波電流通電時の銅損 W_{cu22} は、計算により予め求められる。具体的には、下記の式（1）を用いて求めることができる。

【 0 0 2 0 】

【 数 1 】

$$(式1) \quad W_{cu} = R_{dc} \times I^2 + R_e \times I^2 \times f^2$$

式（1）において、 W_{cu} は銅損、 R_{dc} は巻線の直流抵抗、 R_e は巻線の渦電流損に相当する交流抵抗係数、 f は周波数、 I は電流値を示す。直流抵抗 R_{dc} は供試リアクトル L 1 の実測値であり、交流抵抗係数 R_e は有限要素法を用いたシミュレーションにより求めることができる。

【 0 0 2 1 】

次に、基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22} とに基づいて、目標鉄損 W_{fet} を算出する（ステップ S 4）。実施形態 1 においてより具体的には、目標鉄損 W_{fet} は、基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22} の和として求められる。

【 0 0 2 2 】

ここで、基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} は、基本波電流通電時の合計損失 W_{T21} から基本波電流通電時の銅損 W_{cu21} を差し引いて求められる。高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22} は、高調波電流通電時の合計損失 W_{T22} から高調波電流通電時の銅損 W_{cu22} を差し引いて求められる。

【 0 0 2 3 】

実施形態 1 では、上述したように、測定された各合計損失を計算により鉄損と銅損とに分離する。具体的には、測定された合計損失 W_{T21} を銅損 W_{cu21} と鉄損 W_{fe21} とに分離し、測定された合計損失 W_{T22} を銅損 W_{cu22} と鉄損 W_{fe22} とに分離する。なお、温度上昇試験の対象が変圧器の場合は、巻線が 2 組あるため他巻線を開放した

10

20

30

40

50

無負荷時の損失を鉄損とし、他巻線短絡時の損失を銅損とすることができるが、リアクトルは、巻線が一組しかないため鉄損と銅損とを個別に測定できない。そのため、前記のように計算で鉄損と銅損とを分離する必要がある。

【 0 0 2 4 】

次に、目標銅損 W_{cut} 及び目標鉄損 W_{fet} を与える電流の周波数及び電流値を、それぞれ試験周波数 f_{ex} 、試験電流値 I_{ex} として算出する（ステップ S 5）。試験周波数 f_{ex} 、試験電流値 I_{ex} は、下記の式（2）の連立方程式により算出できる。

【 0 0 2 5 】

【 数 2 】

$$(式2) \begin{cases} W_{cu} = R_{dc} \times I^2 + R_e \times I^2 \times f^2 \\ W_{fe} = K_h \times I^n \times f + K_e \times I^2 \times f^2 \end{cases}$$

10

式（2）において、 R_{dc} は巻線の直流抵抗、 R_e は巻線の渦電流損に相当する交流抵抗係数であり、上述の通りこれらの値は既知である。 W_{fe} は鉄損である。 n はスタインメッツの定数（1.6程度）であり供試リアクトル L_1 を構成する材料により定まっている。 K_h はヒステリシス損失係数、 K_e は渦電流損失係数であり、基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22} とから、求められる係数である。よって式（2）中の未知数は、周波数と電流であり、この連立方程式を解くことにより求められ、それぞれ試験周波数 f_{ex} 、試験電流値 I_{ex} となる。

20

【 0 0 2 6 】

図 2 に示される実施形態 1 の事例において、連立方程式の解としての試験周波数 f_{ex} は、基本波周波数 5 0 H z と第 5 調波周波数 2 5 0 H z の間の値を取り、例えば 1 3 0 H z 程度であるように算出される。

【 0 0 2 7 】

次に、試験周波数 f_{ex} 、試験電流値 I_{ex} を有する試験電流を供試リアクトル L_1 に通電し、供試リアクトル L_1 の所定箇所の温度が一定になるまで通電する（ステップ S 6）。所定箇所の温度とは、例えば、供試リアクトル L_1 の巻線の温度である。また、鉄心の温度である。さらに供試リアクトル L_1 が、油入式リアクトルである場合には、所定箇所の温度は、絶縁油の温度であってもよい。以上のようにして、実施形態 1 に係る温度上昇試験が実施される。

30

【 0 0 2 8 】

なお、上述では、基本波電流に 1 つの高調波電流が重畳する場合について説明した。それに対して、基本波電流に 1 つ以上の高調波電流が重畳する場合の目標銅損 W_{cut} 及び目標鉄損 W_{fet} の算出は以下による。

【 0 0 2 9 】

前記目標銅損 W_{cut} の算出は、ステップ S 3 において、所定の第 1 電流値 i_{21} の基本波電流通電時の銅損 W_{cu21} と、銅損 W_{cu22m} とに基づいて算出する。銅損 W_{cu22m} は、それぞれ所定の次数の所定の第 2 電流値 i_{22m} の高調波電流通電時のそれぞれの銅損である。ここで、 m は選択された高調波電流の次数を示す。銅損 W_{cu22m} は、選択された次数を有する高調波電流の通電時における各銅損を表す。よって、銅損 W_{cu22m} は選択された次数だけ存在する。

40

【 0 0 3 0 】

例えば、基本波電流に重畳する高調波電流が第 5 調波及び第 7 調波となる場合について説明する。その場合、目標銅損 W_{cut} は、所定の第 1 電流値 i_{21} の基本波電流通電時の銅損 W_{cu21} と、所定の第 2 電流値 i_{225} の第 5 調波電流通電時の銅損 W_{cu225} と、所定の第 2 電流値 i_{227} の第 7 調波電流通電時の銅損 W_{cu227} と、に基づいて算出する。具体的には、目標銅損 W_{cut} は、基本波電流通電時の銅損 W_{cu21} と、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の銅損 W_{cu22m} の和として求められる。前記

50

の例では、目標銅損 W_{cut} は、銅損 W_{cu21} と銅損 W_{cu225} と銅損 W_{cu227} との和により求められる。

【0031】

また、目標鉄損 W_{fet} は、ステップ S_4 において、所定の第1電流値 i_{21} の基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22m} と、に基づいて求められる。

【0032】

例えば、基本波電流に重畳する高調波電流が第5調波及び第7調波となる場合について説明する。その場合、目標鉄損 W_{fet} は、所定の第1電流値 i_{21} の基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、所定の第2電流値 i_{225} の第5調波電流通電時の鉄損 W_{fe225} と、所定の第2電流値 i_{227} の第7調波電流通電時の鉄損 W_{fe227} と、に基づいて算出する。言い換えると、目標鉄損 W_{fet} は、基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22m} の和として求められる。前記の例では、目標鉄損 W_{fet} は、鉄損 W_{fe21} と鉄損 W_{fe225} と鉄損 W_{fe227} との和により求められる。

10

【0033】

ここで、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22m} は、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の合計損失 WT_{22m} から、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の銅損 W_{cu22m} を差し引いて求められる。具体的には、鉄損 W_{fe225} は、第5調波電流通電時の合計損失 WT_{225} から銅損 W_{cu225} を差し引いて求められる。同様に、鉄損 W_{fe227} は、第7調波電流通電時の合計損失 WT_{227} から銅損 W_{cu227} を差し引いて求められる。なお、合計損失 WT_{225} 及び合計損失 WT_{227} は、ステップ2において、それぞれ所定の電流値の所定の次数（第5調波電流及び第7調波電流）の高調波電流を供試リアクトル L_1 にそれぞれ通電し、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の損失を測定することで求められる。

20

【0034】

このように、基本波電流に1つ以上の高調波電流が重畳するのを模擬する場合は、選択した任意の次数を有する高調波電流毎の銅損、鉄損、合計損失と、基本波電流通電時の銅損、鉄損、合計損失とに基づき、計算を行う。

【0035】

< 温度上昇試験方法の検証 >

実施形態1に係る温度上昇試験方法について、図2に基づき以下に検証する。図2において、基本波電流の定格周波数は50Hzである。従来試験Xは、基本波電流100%に基本波電流比35%の第5調波含有率の第5調波電流を重畳して、供試リアクトルに通電し、合計損失 WT_x を供給することで実施される。

30

【0036】

図2の従来試験Xの列には、上述の計算方法により求められた銅損 W_{cu_x} と、合計損失 WT_x と銅損 W_{cu_x} の差異として求められた鉄損 W_{fe_x} が併せて示されている。従来試験Xは、現に基本波電流に高調波が重畳された電流が供試リアクトル L_1 に通電されて実行されており、実使用状態が模擬された試験である。

40

【0037】

従来試験Xの合計損失 WT_x に対する銅損 W_{cu_x} 及び鉄損 W_{fe_x} の割合は、実使用状態が模擬されているといえる。つまり、各温度上昇試験において各損失の値が従来試験Xの値に近づく程、試験電流の供試リアクトル L_1 への通電が、実使用状態をより忠実に模擬できているといえる。

【0038】

しかしながら、従来試験Xは、基本波に高調波を重畳して供試リアクトルに供給する必要があり、基本波電源と高調波電源それぞれに、他方の電流が流入する問題がある。基本波電源を商用電源からとる場合には、商用電源の系統に高調波電流が流出してしまう問題がある。また、商用電源系統へ高調波電流が流出しても供試リアクトルに流れる試験電流

50

を確保するためには、高調波電源の電源容量を大きくする必要がある。

【 0 0 3 9 】

そこで、基本波電源と高調波電源との間の相互の電流の流入を防ぐために、図 4 に示す試験用の回路構成が知られている。この回路構成では、重畳用変圧器 2 台（重畳用変圧器 $T \times 1$ 、 $T \times 2$ ）及び供試リアクトル 2 台（供試リアクトル $L \times 1$ ・ $L \times 2$ ）が必要となるため、試験設備が大掛かりになる。特に、同一の構成の供試リアクトルが 2 台必要となるため、供試リアクトルを経済的に 1 台しか準備できない場合、従来試験 X を実施できない問題がある。

【 0 0 4 0 】

次に、従来試験 Y について検証する。上述したように、従来試験 Y は、リアクトルの損失に含まれる銅損と鉄損の周波数依存性を反映せずに、基本波電流のみで通電を行う。具体的には、所定の第 1 電流値 i_{21} の基本波電流を供試リアクトル L_1 に通電し、基本波電流通電時の合計損失 W_{T21} を求める。また、第 2 電流値 i_{22} の高調波電流を供試リアクトル L_1 に通電し、高調波電流通電時の合計損失 W_{T22} を求める。ここまでは、実施形態 1 に係る温度上昇試験方法の流れと同じである。

10

【 0 0 4 1 】

その後従来試験 Y では、基本波電流通電時の合計損失 W_{T21} と高調波電流通電時の合計損失 W_{T22} とを足した目標合計損失 W_{Ty} を求め、供試リアクトル L_1 の損失が目標合計損失 W_{Ty} となるように、基本波電流のみを供試リアクトル L_1 に通電する。

【 0 0 4 2 】

しかしながら、前記式 (2) でも明らかなように、銅損と鉄損とでは、周波数特性が異なる。そのため、従来試験 Y では、異なる周波数の 2 つ以上の電流が重畳される実使用状態を十分に模擬できない。より詳しくは、従来試験 Y では、銅損 W_{cuy} は実使用時と比較して過大な損失となり、鉄損 W_{fey} は実使用時と比較して過小な損失となる。

20

【 0 0 4 3 】

図 2 では、従来試験 X では銅損 W_{cux} が 882 W、鉄損 W_{fex} が 990 W であるのに対して、従来試験 Y では、銅損 W_{cuy} が 1150 W、鉄損 W_{fey} が 618 W と大きく異なっている。銅損は $1150 / 882$ で従来試験 X の約 1.3 倍、鉄損は $618 / 990$ で従来試験 X の約 0.6 倍となる。従来試験 Y では、リアクトルの実使用状態を十分に模擬できていないことが分かる。

30

【 0 0 4 4 】

そのため、従来試験 Y での温度上昇試験に合格するためには、リアクトルの巻線について、巻線抵抗を過剰に低減させるなど過剰設計とせざるを得ない。また、鉄損については、温度上昇試験時に実使用状態の損失を供給できていないため、温度上昇試験に合格してもリアクトルの鉄心に関する検証は不十分となる問題がある。

【 0 0 4 5 】

続いて、実施形態 1 に係る温度上昇試験方法について検証する。従来試験 Y では、供試リアクトル L_1 の損失が目標合計損失 W_{Ty} となるように、基本波電流を通電していた。言い換えると、従来試験 Y では、試験電流について、周波数を基本波と同じに固定して、電流値のみを調整していた。それに対して、実施形態 1 に係る温度上昇試験方法では、試験電流について、電流値に加え、周波数も調整することにより、実使用状態に即した損失の供給を可能にしている。

40

【 0 0 4 6 】

図 2 に示すように、実施形態 1 の目標銅損 W_{cut} は、従来試験 X の銅損 W_{cux} の値と一致する。目標合計損失 W_{Tt} は、従来試験 Y の目標合計損失 W_{Ty} と同じである。従来試験 Y と比較して実施形態 1 の温度上昇試験方法が実使用状態をより忠実に模擬できているといえる。

【 0 0 4 7 】

以上、実施形態 1 に係る温度上昇試験方法の効果についてまとめる。実施形態 1 に係る温度上昇試験方法は、周波数の異なる電流を重畳することなく、実使用状態を模擬した通

50

電を行うことができる。また、基本波電源及び高調波電源を試験回路に用いることによる、互いに他の電流が流入するという問題が無く、簡単な試験用の回路構成で温度上昇試験が実現可能となる。加えて、供試リアクトルが1台で良いとのメリットもある。

【0048】

〔実施形態2〕

本発明の実施形態2について以下に説明する。実施形態2では、目標鉄損 W_{fet} を補正して、補正目標鉄損 W_{fet1} （目標鉄損）を求めることが実施形態1とは異なり、その他の構成、手順は実施形態1と同様である。

【0049】

図2の実施形態1と従来試験Xの各損失の値を比較すると、従来試験Xの鉄損 W_{fex} よりも実施形態1の目標鉄損 W_{fet} の方が小さい。これは、鉄心を構成する電磁鋼板が非線形特性を持つため、基本波電流通電時の鉄損と第5調波電流通電時の鉄損とを足し合わせた損失（図2の実施形態1の目標鉄損 $W_{fet} = 886W$ ）に対して、重畳した場合の鉄損（図2の従来試験Xの鉄損 $W_{fex} = 990W$ ）が大きくなるためである。

10

【0050】

図3は、第3調波を含む歪波磁束の50Hz、10kGにおけるヒステリシス曲線の例を示す図である。図3に示されるように、高調波の重畳位相によってヒステリシス曲線31、32、33の形状が変わることは明らかである。よって、高調波の重畳位相によって基本波電流に高調波を重畳する場合の鉄損の大きさは異なるのである。

【0051】

このように基本波電流に高調波電流を重畳する際の鉄損の挙動は複雑である。しかし、類似設計のリアクトルについての重畳試験結果や、供試リアクトルL1の材料特性より鉄損を経験的に見積もることは可能である。鉄損の補正係数をKとし、供給すべき補正目標鉄損 W_{fet1} を、実施形態1における目標鉄損 W_{fet} に補正係数Kを乗じた値としてより適切に見積もることができる。補正係数Kは、1以上の係数である。

20

【0052】

言い換えると、補正目標鉄損 W_{fet1} は、基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22} の和である目標鉄損 W_{fet} に、所定の係数Kを乗じて求められる。補正係数Kは、一定ではなく、リアクトルにおける基本波の磁束密度、高調波の磁束密度、重畳位相、材質等によって変化する。

30

【0053】

そのため、種々の設計のリアクトルについて、補正係数Kの値をデータベース化しておくことで、データベースより供試リアクトルL1の補正係数Kを決定することができるようになる。供試リアクトルL1の設計条件を参考に、データベースに基づき補正係数Kを決定することで、より実使用状態を的確に模擬した試験電流値、試験周波数を求めることが可能となる。

【0054】

図2の事例においては、 $K = 1.12$ とし、補正後の補正目標鉄損 W_{fet1} は以下のように求めることができる。補正目標鉄損 $W_{fet1} = 886 \times 1.12 = 990(W)$ となる。このように、図2の従来試験Xの鉄損と一致するようにさせることができるようになる。

40

【0055】

次いで、実施形態1におけるステップS5と同様にして、目標銅損 W_{cut} 及び補正目標鉄損 W_{fet1} を与える電流の周波数及び電流値を、それぞれ試験周波数 f_{ex1} 、試験電流値 I_{ex1} として、式(2)の連立方程式により算出する。

【0056】

このように、補正目標鉄損 W_{fet1} を求めることで、従来試験Xの重畳試験とほぼ等価な各損失の供給を実現することができる。その結果、鉄心の非線形特性を考慮した、信頼性の高い試験方法を提供できる。

【0057】

50

なお、基本波電流に1つ以上の高調波電流が重畳するのを模擬する場合は、基本波電流通電時の鉄損 W_{fe21} と、それぞれ所定の次数の高調波電流通電時の鉄損 W_{fe22m} の和に、1以上の係数を乗じて目標鉄損 W_{fet} を求める。

【0058】

以上の実施形態1及び実施形態2の具体例では、非特許文献1に記載された進相コンデンサ用直列リアクトルの許容電流種別Iの条件で説明した。本発明は、許容電流種別IIの条件でも適用可能である。この場合には、高調波電流は、基本波の第5調波であり、基本波電流比55%の電流値を有するものとする。また、本発明は、高調波電流が流入するフィルタ用リアクトルにおいても適用可能である。フィルタ用リアクトルの場合は、コンデンサとの組み合わせを調整することにより、自由に共振周波数を選択可能であり、例えば、流入する高調波を第11調波、第13調波、及び第23調波等とすることができる。さらに、フィルタ回路の構成を調整することにより、基本波電流の他に、例えば、第5調波と第7調波のように複数の高調波電流が流入する場合もあるが、同様に本発明が適用可能である。

10

【0059】

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。さらに、各実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を組み合わせることにより、新しい技術的特徴を形成することができる。

20

【0060】

〔まとめ〕

本発明の態様1に係るリアクトル(供試リアクトル L_1)の温度上昇試験方法は、所定の電流値(i_{21})の基本波電流通電時の銅損(W_{cu21})と、それぞれ所定の電流値(i_{22m})の所定の次数の高調波電流通電時のそれぞれの銅損(W_{cu22m})とに基づいて、目標銅損(W_{cut})を算出するステップ(ステップS3)と、前記基本波電流通電時の鉄損(W_{fe21})と、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損(W_{fe22m})とに基づいて、目標鉄損(W_{fet})を算出するステップ(ステップS4)と、前記目標銅損(W_{cut})及び前記目標鉄損(W_{fet})を与える電流の周波数及び電流値を、それぞれ試験周波数(f_{ex})、試験電流値(I_{ex})として算出するステップ(ステップS5)と、前記試験周波数、前記試験電流値を有する試験電流を前記リアクトルに通電し、前記リアクトルの所定箇所の温度が一定になるまで通ずるステップ(ステップS6)と、を備えている。

30

【0061】

前記構成によれば、リアクトルに通ずる試験電流の、電流値及び周波数を調整するため、基本波電流に各高調波電流が重畳された状態の各損失を模擬して温度上昇試験を行うことができる。その結果、簡易な試験回路で実使用状態に即した温度上昇試験を実現することができる。

【0062】

本発明の態様2に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、前記態様1において、前記基本波電流通電時の銅損(W_{cu21})、及び、それぞれの前記高調波電流通電時の銅損(W_{cu22m})は、計算により予め求められてもよい。

40

【0063】

前記構成によれば、基本波電流通電時の銅損及び各高調波電流通電時の銅損を求めることができる。

【0064】

本発明の態様3に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、前記態様2において、所定の電流値(i_{21})の基本波電流を前記リアクトル(供試リアクトル L_1)に通電し、前記基本波電流通電時の損失(合計損失 W_{T21})を測定するステップ(ステップS1)と、それぞれ所定の電流値(i_{22m})の前記所定の次数の高調波電流を前記リアクトルにそ

50

れぞれ通電し、それぞれの前記高調波電流通電時の損失（合計損失 $W T 2 2 m$ ）を測定するステップ（ステップ $S 2$ ）と、を更に備え、前記基本波電流通電時の鉄損（ $W f e 2 1$ ）は、前記基本波電流通電時の損失（合計損失 $W T 2 1$ ）から前記基本波電流通電時の銅損（ $W c u 2 1$ ）を差し引いて求められ、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損（ $W f e 2 2 m$ ）は、それぞれの前記高調波電流通電時の損失（合計損失 $W T 2 2 m$ ）からそれぞれの前記高調波電流通電時の銅損（ $W c u 2 2 m$ ）を差し引いて求められてもよい。

【0065】

前記構成によれば、基本波電流通電時の鉄損及び各高調波電流通電時の鉄損を求めることができる。

【0066】

本発明の態様4に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、前記態様1から3のいずれかにおいて、前記目標銅損（ $W c u t$ ）は、前記基本波電流通電時の銅損（ $W c u 2 1$ ）と、それぞれの前記高調波電流通電時の銅損（ $W c u 2 2 m$ ）の和として求められてもよい。

【0067】

前記構成によれば、基本波電流通電時の銅損と、各高調波電流通電時の銅損の和を算出することで、温度上昇試験において目標とする巻線の損失である目標銅損を求めることができる。

【0068】

本発明の態様5に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、前記態様1から4のいずれかにおいて、前記目標鉄損（ $W f e t$ ）は、前記基本波電流通電時の鉄損（ $W f e 2 1$ ）と、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損（ $W f e 2 2 m$ ）の和として求められてもよい。

【0069】

前記構成によれば、基本波電流通電時の鉄損と、各高調波電流通電時の鉄損の和を算出することで、温度上昇試験において目標とする鉄心の損失である目標鉄損を求めることができる。

【0070】

本発明の態様6に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、前記態様1から4のいずれかにおいて、前記目標鉄損（ $W f e t 1$ ）は、前記基本波電流通電時の鉄損（ $W f e 2 1$ ）と、それぞれの前記高調波電流通電時の鉄損（ $W f e 2 2 m$ ）の和に、1以上の係数（ K ）を乗じて求められてもよい。

【0071】

前記構成によれば、試験電流通電時の目標鉄損を、基本波と各高調波とを重畳して通電させる温度上昇試験の鉄損と一致させることができる。その結果、鉄心の非線形特性を考慮した、信頼性の高い試験方法を提供できる。

【0072】

本発明の態様7に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、前記態様1から6のいずれかにおいて、前記基本波電流の所定の電流値（ $i 2 1$ ）は、前記リアクトル（供試リアクトル $L 1$ ）の定格電流値であってもよい。前記構成によれば、実使用状態に即した温度上昇試験を実現することができる。

【0073】

本発明の態様8に係るリアクトルの温度上昇試験方法は、前記態様1から7のいずれかにおいて、選択された前記高調波電流の次数は5であってもよい。前記構成によれば、実使用状態に即した温度上昇試験を実現することができる。

【符号の説明】

【0074】

100 試験回路

E 1 周波数可変電源

C 1 補償コンデンサ

L 1 供試リアクトル

W c u 2 1 基本波電流通電時の銅損

10

20

30

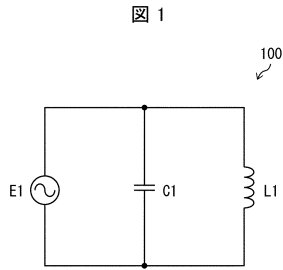
40

50

- W c u 2 2、W c u 2 2 m 高調波電流通電時の銅損
- W c u t 目標銅損
- W f e 2 1 基本波電流通電時の鉄損
- W f e 2 2、W f e 2 2 m 高調波電流通電時の鉄損
- W f e t 目標鉄損
- W f e t 1 補正目標鉄損（目標鉄損）
- W T 2 1 基本波電流通電時の合計損失
- W T 2 2、W T 2 2 m 高調波電流通電時の合計損失
- W T t 目標合計損失

【図面】

【図 1】



【図 2】

図 2

	従来試験X		基本波		第5調波		合計		従来試験Y		実施形態1		実施形態2	
	WcuX	WfeX	Wcu21	Wfe21	Wcu22	Wfe22	Wcu22	Wfe22	WcuY	WfeY	WcuT	WfeT	WcuT	WfeT
銅損	882		772		110		882		1150		882		882	
鉄損		990	415		471		886		618		886		990	
合計損失		1872	1187		581		1768		1768		1768		1872	

10

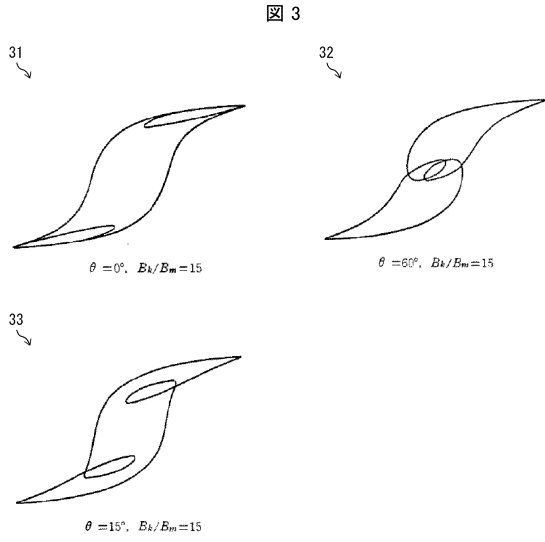
20

30

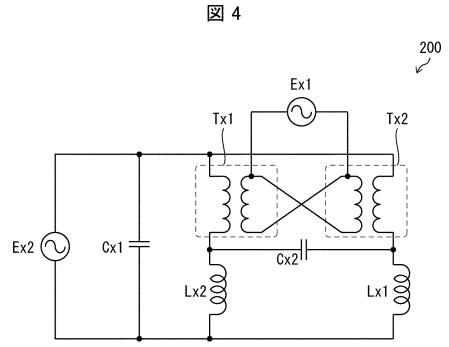
40

50

【 図 3 】



【 図 4 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 実公昭49-9938(JP,Y2)
国際公開第2012/137494(WO,A1)
国際公開第2011/118507(WO,A1)
特開2007-81184(JP,A)
特開2008-141012(JP,A)
特開2008-122210(JP,A)
特開2016-133355(JP,A)
中国特許出願公開第104834781(CN,A)
中国特許出願公開第110147559(CN,A)
米国特許出願公開第2017/0373629(US,A1)
田中 智紀 ほか,リアクトルの損失解析 - 強制対流下での直流通電実験 -,平成26年
電気学会全国大会講演論文集 [CD-ROM] 平成26年電気学会全国大会講演論文集
(第4分冊) The 2014 Annual Meeting Record I.E.E.Japan 2014 ANNUAL MEETING REC
ORD I.E.E.JAPAN,日本,2014年03月20日,第4分冊,p.123-124
- (58)調査した分野 (Int.Cl.,DB名)
G01R 27/26
G01R 33/12
G01R 31/00
H01F 27/28
H01F 27/24
H01F 27/00
H01F 37/00