配電用柱上変圧器の直流偏磁現象

正員 山本文雄 (関西電力)
 正員 北村章夫 (関西電力)
 正員 芝原和人 (日新電機)
 非会員 山田容士 (日新電機)

Asymmetrical Excitation of Distribution Pole Transformer Due to Direct Current Inflows

Fumio Yamamoto, Member, Akio Kitamura, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.)

Kazuhito Shibahara, Member, Hiroshi Yamada, Non-member (Nissin Electric Co., Ltd.)

When a photovoltaic power generation system is to be connected with a low voltage distribution line, it is necessary to install an insulated transformer or interrupt the operation of an inverter by detecting the direct current leaking from the inverter, in order to prevent the occurrence of asymmetrical excitation of a distribution pole transformer due to the flow of direct current into it.

In this paper, the phenomenon of asymmetrical excitation of a distribution pole transformer due to direct current inflows was studied both experimentally and through a theoretical simulation, in order to clarify the detection level of the direct current in question. Test results showed that the excitation current increases in proportion to the direct current, and that the smaller the transformer capacity, the larger the ratio of the excitation current to the rated load current. These findings agreed with the results of the theoretical simulation.

キーワード：直流偏磁，絶縁変圧器，配電用柱上変圧器，太陽光発電，系統連系技術要件ガイドライン

1. まえがき

平成5年3月31日付資源エネルギー庁公益事業部長通達(5資公第153号)「系統連系技術要件ガイドライン」⁽¹⁾(以下、ガイドラインと言う。)で、低圧配電線と太陽光発電システム等を連系する場合、インバータから直流が系統へ流出し、配電用柱上変圧器が直流偏磁することを防止するため、原則として絶縁変圧器を設置しなければならないことが規定された。しかし、この絶縁変圧器は、システムの大型化・コストアップの原因になり、太陽光発電の普及促進に対し問題があるため、次の2つの条件を同時に満たす場合は、絶縁変圧器が省略できることになっている。

[1] 直流回路を非接地とするか、または高周波変圧器で絶縁する。

[2] 交流出力側に直流検出器を設置し、直流検出時に交流出力を停止する機能を有する。

したがって、絶縁変圧器を省略するためには、配電用柱上変圧器の直流偏磁現象を明かにし、電気事業者の設備に悪影響を与えないという観点から、直流検出レベルを明確

にしておく必要がある。

従来、変圧器の直流偏磁現象は、磁気嵐により長距離送電系統に誘導した直流電流が、変圧器に流入することに対し、研究が進められてきた^{(2)~(6)}。さらに近年は、直流送電設備やSVC(Static Var Compensator)等のパワーエレクトロニクス機器を送電系統へ設置するようになってきており、これらの制御回路の故障により、交流側に直流が流出されるため、これらの設備に用いられる変圧器の直流偏磁現象に対する研究も進められている^{(6)・(7)}。

本研究では、この直流検出レベルを明確にするため、配電用柱上変圧器の直流偏磁現象を、実験および理論シミュレーションの両面から検討したので報告する。

2. 直流偏磁の原理

<2・1> 1次側開放2次側直流・交流励磁の場合 図1にモデル回路、図2にこの回路に対応する直流偏磁現象の概念図を示す。ここで、 R_2 は、2次側回路の直流電流成分 I_{dc} の制限はできるが、交流電圧電源 v_{ac} に対しては十分小さく、励磁電流の交流成分は制限しないと仮定する。

V_{ac} : 交流電源電圧
 E_{dc} : 直流電源電圧
 R_2 : 2次側抵抗
 i_2 : 2次側電流

図1 モデル回路
 Fig.1. Model circuit.

Φ : 変圧器鉄心の磁束
 I_{dc} : i_2 の直流成分
 Φ_{dc} : I_{dc} に対応する Φ
 Φ_{max} : i_2 の最大値に対応する Φ
 Φ_{min} : i_2 の最小値に対応する Φ
 Φ_0 : 直流偏磁量 = $(\Phi_{max} + \Phi_{min}) / 2$

図2 直流偏磁現象の概念図

Fig.2. Ideal diagram for asymmetrical excitation phenomenon due to direct currents.

定常状態における直流偏磁のメカニズムは、次のように説明できる。まず、直流回路成分のみを考えると、2次側回路には $I_{dc} = E_{dc} / R_2$ の直流電流が流れる。その結果、励磁電流の交流成分の零レベルは、正側に I_{dc} 押し上げられ、励磁電流 i_2 と磁束 Φ の波形は、図2のように変圧器鉄

心の励磁特性に対応した形になる。すなわち、 I_{dc} による偏磁量 Φ_0 は、 $(\Phi_{max} + \Phi_{min}) / 2$ になり、通常、 I_{dc} に対応する Φ_{dc} より小さい値となる。

<2.2> 1次側交流励磁・2次側直流励磁の場合 図3

にモデル回路、図4にこの回路に対応する直流偏磁現象の概念図を示す。ここで、 R_2 は、2次側回路の直流電流成分 I_{dc} を制限するためのものである。 R_1 は、十分小さく、1次側回路の励磁電流の交流成分は制限しないと仮定する。

定常状態における直流偏磁のメカニズムは、次の3つの条件を満足するように決定される⁽⁴⁾。

- [1] 変圧器の励磁電流は、交流励磁側（1次側）および直流励磁側（2次側）から供給される励磁電流の合成である。
- [2] 交流励磁側（1次側）から供給する電流には、直流成分を含まない。
- [3] 直流励磁側（2次側）から供給する電流の直流成分は、直流電源電圧を2次側回路の抵抗で除したものになる。

[1] は、磁気回路における重ねの理から明白である。

[2] と [3] は、図3のモデル回路を使って、次のように説明できる。

まず、

$$\Phi_{11} = L_1 i_1 \quad (1)$$

$$\Phi_{12} = M i_2 \quad (2)$$

$$\Phi_{21} = M i_1 \quad (3)$$

$$\Phi_{22} = L_2 i_2 \quad (4)$$

とすると、1次側回路および2次側回路の回路方程式は、

$$V_{ac} = R_1 i_1 + \frac{d\Phi_{11}}{dt} + \frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad (5)$$

$$E_{dc} = R_2 i_2 + \frac{d\Phi_{22}}{dt} + \frac{d\Phi_{21}}{dt} \quad (6)$$

両式の両辺を $t = 0$ から T まで1周期を積分すると、

$$\int_{t=0}^{t=T} V_{ac} dt = R_1 \int_{t=0}^{t=T} i_1 dt + \int_{t=0}^{t=T} \frac{d\Phi_{11}}{dt} dt + \int_{t=0}^{t=T} \frac{d\Phi_{12}}{dt} dt \quad (7)$$

$$\int_{t=0}^{t=T} E_{dc} dt = R_2 \int_{t=0}^{t=T} i_2 dt + \int_{t=0}^{t=T} \frac{d\Phi_{22}}{dt} dt + \int_{t=0}^{t=T} \frac{d\Phi_{21}}{dt} dt \quad (8)$$

この回路が定常状態における場合を考えると、交流電圧電源 V_{ac} は、正負対称の正弦波であるため、

$$\int_{t=0}^{t=T} V_{ac} dt = 0 \quad (9)$$

次に定常状態であるため、磁束 Φ_{11} は、周期が T の周期関数となるため、次の関係が成り立つ。

$$\Phi_{11}(t=0) = \Phi_{11}(t=T) \quad (10)$$

したがって、

- E_{dc} : 直流電源電圧
 V_{ac} : 交流電源電圧 (周期 T の正弦波)
 R_1 : 1 次側抵抗
 R_2 : 2 次側抵抗
 i_1 : 1 次側電流
 i_2 : 2 次側電流
 L_1 : 1 次巻線の自己インダクタンス (非線形)
 L_2 : 2 次巻線の自己インダクタンス (非線形)
 M : 1・2 次巻線の相互インダクタンス (非線形)

図3 モデル回路

Fig. 3. Model circuit.

- Φ : 変圧器鉄心の磁束
 i : $i_1 + i_2$ (今回の議論では巻数比 = 1 と仮定)
 I_{dc} : i_2 の直流成分
 Φ_{dc} : I_{dc} に対応する Φ
 Φ_{max} : i の最大値に対応する Φ
 Φ_{min} : i の最小値に対応する Φ
 Φ_0 : 直流偏磁量 = $(\Phi_{max} + \Phi_{min}) / 2$

図4 直流偏磁現象の概念図

Fig. 4. Ideal diagram for asymmetrical excitation phenomenon due to direct currents.

$$\int_{t=0}^{t=T} d\Phi_{11} = \Phi_{11}(t=T) - \Phi_{11}(t=0) = 0 \quad (11)$$

同様に、

$$\int_{t=0}^{t=T} d\Phi_{12} = \int_{t=0}^{t=T} d\Phi_{21} = \int_{t=0}^{t=T} d\Phi_{22} = 0 \quad (12)$$

したがって、(7)、(9)、(11)、および(12)式より、

$$\int_{t=0}^{t=T} i_1 dt = 0 \quad (13)$$

すなわち、交流励磁側から供給する電流 i_1 には、直流成分を含まない。

次に、(8)、および(12)式より

$$\int_{t=0}^{t=T} E_{dc} dt = R_2 \int_{t=0}^{t=T} i_2 dt \quad (14)$$

ここで、

$$i_2 = I_{dc} + i_{2ac} \quad (15)$$

I_{dc} : i_2 の直流成分

i_{2ac} : 基本波の周期を T とする交流歪波成分
 とすると、(14)式は、

$$E_{dc} \cdot T = R_2 \cdot I_{dc} \cdot T + R_2 \int_{t=0}^{t=T} i_{2ac} dt \quad (16)$$

ここで、 i_{2ac} には直流成分は含まれないので、

$$\int_{t=0}^{t=T} i_{2ac} dt = 0 \quad (17)$$

したがって、

$$I_{dc} = \frac{E_{dc}}{R_2} \quad (18)$$

すなわち、直流励磁側から供給する電流 i_2 の直流成分は、直流電源電圧 E_{dc} を 2 次側回路の抵抗 R_2 で除したものになる。

以下、[1]、[2]、および[3]の条件で決定される定常状態の直流偏磁のメカニズムを、図4により説明する。まず、直流回路成分のみを考えると、2 次側回路には $I_{dc} = E_{dc} / R_2$ の直流電流が流れる。その結果、<2・1>の場合と同様に、1 次側と 2 次側の合成である変圧器の励磁電流 i の交流成分の零レベルは、正側に I_{dc} 押し上げられ、励磁電流 i と磁束 Φ の波形は、図4のように変圧器鉄心の励磁特性に対応した形になる。 i_1 は、 i から i_2 成分を除いたものである。ここで、 i_1 の波形は、直流偏磁により歪むが、直流成分は含まれない。この場合も、 I_{dc} による偏磁量 Φ_0 は、 $(\Phi_{max} + \Phi_{min}) / 2$ になり、通常、 I_{dc} に対応する Φ_{dc} より小さい値となる。

このように原理的には、変圧器の直流偏磁現象は、交流励磁が 1 次側であっても 2 次側であっても同じであるといえる。

3. 直流偏磁の実験

今回の実験では、表1に示す3種類の配電用柱上変圧器に対し、直流励磁を2次側(210V側)から行った場合で、交流励磁が2次側および1次側(6600V側)の2ケースについて実施した。図5に実験回路を示す。2次側の電源は、直流と交流を両方発生できる8kVAの電源装置を使用し、1次側は、30MVAの回転機発電機を使用した。

変圧器の励磁インダクタンスは、一般に飽和していない領域では、大きく、特に今回の実験において1次側で交流励磁した場合は、励磁電流の変化の時定数が数秒から数十秒になることがあった。そこで、本実験では、直流印加後1分以上経過した後の励磁電流を測定し検討を行った。

Tr: 変圧器6600/210V PT1:PT11000/110V
Src:交直電源 PT2:PT 1100/110V
R: 直流抑制抵抗(1Ω) Sh: ショント抵抗2500A/25V

(a) 1次側開放2次側直流・交流励磁の場合

Tr: 変圧器6600/210V PT1:PT11000/110V
G: 発電機 PT2:PT 1100/110V
Src:直流電源 Sh1:ショント抵抗5A/1V
R: 直流抑制抵抗 Sh2:ショント抵抗2500A/25V
CT: CT5/5A
10kVA:242Ω
50・133kVA:121Ω

(b) 1次側交流励磁・2次側直流励磁の場合

図5 実験回路

Fig. 5. Circuits for tests.

表1 供試変圧器

Table 1. Transformers for tests.

定格容量[kVA]	10	50	133
定格電圧[V]	6600/210		
無負荷電流[%]	3.0	2.3	2.3
無負荷損[W]	58	230	480
鉄心材質	けい素鋼板		
面積[cm ²]	61.3	175.1	225.6
心磁路長[cm]	54.5	65.0	99.4

4. 直流偏磁のシミュレーション

今回の検討では、実験結果の妥当性を確認するため、図5の実験回路に対し、EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) ⁽⁸⁾ を使った計算機シミュレーションを実験と並行して行った。計算に用いるEMTPの回路素子TRANSFORMERの磁気飽和特性は、実験によって測定した2次側電圧-2次側励磁電流特性から求めた磁束-2次側励磁電流特性(図6)を適用した。EMTPの計算に用いた変圧器の定数を表2に示す。

図6 磁束-2次側励磁電流特性

Fig. 6. Characteristics of magnetic flux versus secondside exciting current.

EMTPは、過渡現象を解析するプログラムであり、定常状態まで長時間を必要とする今回の現象では、その使用にあたって、多大な計算時間を必要とする。そこで強制的にある時刻の間直流バイアスをかけ過渡状態の時間を短縮する工夫が文献(4)および(5)でなされている。しかし、今回は、実験を通して定常状態に落ちつく時間の見通しを立てることができたこと(図5(b)の1次側交流励磁の場合、数秒から数十秒)、およびワークステーションクラスの計算機を使用できたことから、あえて強制的に過渡状態の時間を抑えることなく、現実に即したシミュレーションを行った。

表2 変圧器の定数

Table 2. Constants of transformers.

定格容量[kVA]	10	50	133
1次側電圧[V]	6,600		
2次側電圧[V]	210		
1次側巻数	2,389	817	629
2次側巻数	76	26	20
2次側鉄損[Ω]	760.345	191.739	91.875
1次側抵抗[Ω]	41.04	4.56	1.245
1次側リアクタンス[Ω]	37.40	19.55	8.45
2次側抵抗[mΩ]	32.14	4.20	1.264
2次側リアクタンス[mΩ]	37.85	19.80	8.55

5. 実験とシミュレーション結果および考察

図7に2次側交流励磁(図5(a)の条件)の場合、図8に1次側交流励磁(図5(b)の条件)の場合の結果を示す。今回の実験とEMTPによるシミュレーション計算結果から一般的に次のようなことがいえる。

- [1] 励磁電流の定格負荷電流に対する割合は、直流電流にほぼ比例して増加する。
- [2] 交流励磁が1次側の場合と2次側の場合で、励磁電流の定格負荷電流に対する割合と直流電流の関係に大きな差はない。
- [3] シミュレーション結果は、実験結果とはほぼ一致し、現実の物理現象を十分再現している。

ここで、[1]は、飽和領域における磁束-励磁電流特性が線形であることを意味しており、このことは図6からも明かである。また、[2]は、2.項の原理のところで説明したように、基本的な変圧器の特性である。

一方、ガイドラインでは、直流の検出レベルを逆変換装置の定格交流電流の1%以下としている。ここで、仮に一般家庭の小容量用として3kVAの逆変換装置を考えると、直流の検出レベルは0.15Aとなる。さらに極めて確率の低いことであるが変圧器に接続されるすべての需要家の逆変換装置が検出レベルである1%の直流を流出したとすると、変圧器の直流偏磁量は、1次側交流励磁のデータ(図8)から表3のようになる。これによると、直流偏磁による励磁電流の増加した波高値は、変圧器容量が小さい程大きい、高々変圧器の定格負荷電流の15%程度であ

表3 直流偏磁の最悪ケース

Table 3. The worst cases of asymmetrical excitation phenomenon of transformers due to direct currents.

変圧器 容量	需要家 口数	合成直流電流 (検出レベル=1%)	励磁電流 [高圧側] (対定格負荷電流)
10kVA	4	0.6A(0.15×4)	15.3%
50kVA	20	3.0A(0.15×20)	13.9%
133kVA	54	8.1A(0.15×54)	13.7%

(a) 10 kVA 配電用柱上変圧器の場合

(b) 50 kVA 配電用柱上変圧器の場合

(c) 133 kVA 配電用柱上変圧器の場合

図7 2次側交流励磁の場合の結果

Fig.7 Results for secondary AC excitation case.

(a) 10 kVA 配電用柱上変圧器の場合

(b) 50 kVA 配電用柱上変圧器の場合

(c) 133 kVA 配電用柱上変圧器の場合

図8 1次側交流励磁の場合の結果

Fig.8 Results for primary AC excitation case.

り、かつ、この励磁電流の波形も急峻で実効値は低くおさえられるため、巻線の発熱や過負荷現象による供給信頼度上の問題は全く無い。また、負荷電流の重量による励磁電流の波高値の増加の危惧の必要は、一般的に両者の最大点が90度程度ずれることから殆どない。したがって、ガイドラインの運用により電力設備側での供給信頼度上の問題は発生しないといえる。

表3および図8の直流電流と励磁電流の比例関係から、更に次のようなことが言える。10 kVA変圧器を例にとると、1%の直流が励磁電流を15.3%まで拡大することから、これを100%まで拡大する直流電流は6.5%(100/15.3)である。同様に、50 kVA変圧器は7.2%、133 kVA変圧器は7.3%である。すなわち、今回の実験結果は、逆変換装置の最低容量を3 kVAと仮定し、直流偏磁による励磁電流の増加した波高値が変圧器の定格負荷電流程度まで許されるとすると、直流の検出レベルを逆変換装置の定格交流電流の6~7%程度まで拡大できることを示している。しかし、この件については、変歪した励磁電流の増加による高調波の発生や電圧降下等の電力品質悪化、鉄損等の増加⁽⁷⁾による電力設備の効率悪化の問題等を総合的に勘案する必要があり、今後の課題である。

6. むすび

本研究は、配電用柱上変圧器の直流偏磁現象を実験とシミュレーションの両面から検討したものであるが、その結果をまとめると以下の通りとなる。

- (1) 直流偏磁した励磁電流の定格負荷電流に対する割合は、直流電流にほぼ比例して増加する。
- (2) 交流励磁が1次側の場合と2次側の場合で、励磁電流の定格負荷電流に対する割合と直流電流の関係に大きな差はない。
- (3) 実験結果とシミュレーション結果は、ほぼ一致している。
- (4) 直流偏磁による励磁電流の増加した波高値は、変圧器容量が小さい程大きい。
- (5) ガイドラインは、電力設備の供給信頼度上十分な直流検出レベルを規定している。

電力設備の供給信頼度のみで考えると、直流の検出レベルを逆変換装置の定格交流電流の1%から6~7%程度まで拡大できる可能性があが、電力品質、電力設備の効率および負荷機器等への影響等を総合的に勘案する必要があり、今後の課題である。

今回の研究の実施にあたり御協力いただいた日新電機および関西電力の関係者各位に心から感謝申し上げます。

(平成6年8月10日受付, 同年11月25日再受付)

文 献

- (1) 資源エネルギー庁: "系統連系技術要件ガイドライン", 5資公第153号(平5-3-31)

- (2) H.C. Tray, G.W. Swift: "ON THE PROBLEM OF TRANSFORMER OVERHEATING DUE TO GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS", IEEE Vol.PAS-104, No.1, 212~219 (1985-1)
- (3) 高須・宮脇・斉藤・藤原: "地磁気誘導電流による変圧器の直流偏磁現象", 電学論B, 113, 435~444 (平5-4)
- (4) 土岐・藤原・石黒: "変圧器の直流偏磁現象に関する解析", 高電圧研究会, HV-89-92
- (5) 高須・財満・藤原・土岐: "EMTPを用いた実規模モデル変圧器", 平成4年電気学会全会, No.891
- (6) 常盤・鈴木・中島・川添・小西・江口: "自励式SVC用変圧器における直流偏磁現象のデジタルシミュレーション", 平成4年電気学会全会, No.890
- (7) 伊藤・竹田・原田・石原・戸高: "直流偏磁下での電磁板の磁気特性", マクネティックス研究会, MAG-93-184
- (8) 雨谷: "過度現象解析プログラムEMTPの最近の動向", 電学誌, 113, 936~944 (平5-11)

山本 文雄 (正員) 1957年 7月10日生まれ。1982年 3月神戸大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年関西電力(株)入社。1992年12月総合技術研究所主任研究員、現在、主として、分散型電源系統連系技術の研究に従事。

北村 章夫 (正員) 1942年 1月16日生まれ。1965年 3月富山大学工学部電気工学科卒業。同年関西電力(株)入社。1980年総合技術研究所主任研究員。現在、総合技術研究所主席研究員。主として、分散型電源系統連系技術の研究に従事。

芝原 和人 (正員) 1954年 2月 8日生まれ。1978年 3月徳島大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年日新電機(株)入社。現在、研究開発部主席研究員。主として、新エネルギーシステムの研究開発に従事。

山田 容士 (非会員) 1964年 4月 7日生まれ。1987年 3月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年日新電機(株)入社。現在、研究開発部電力システムグループにおいて、新型分散電源システムの開発に従事。