

Zig-zag 变压器的建模与应用

周 鹏¹, 郭忠文²

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003;

2. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 在低压配电网中零序性谐波日益严重的情况下, 曲折接线(Zig-zag)变压器为抑制零序性谐波提供了一种比较新颖的方法。针对配电系统中所存在的零序性电流, 首先在理论分析的基础上, 建立了 Zig-zag 变压器的分析模型, 并针对三相不平衡负载和三相不平衡电源及作为整流变压器应用这 3 种情况进行了仿真分析, 通过分析可以知道 Zig-zag 变压器在三相不对称运行时可以相互补偿铁芯的磁通量, 最大限度地控制各相感应电动势的一致性, 从而保持三相平衡, 降低零线电流。

关键词: Zig-zag 变压器; 三相不对称; 零序性电流; 分析模型; 仿真分析

中图分类号: TM 401⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0093-03

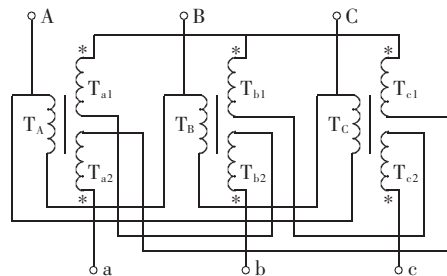
0 引言

随着电力电子装置的广泛应用, 电力系统中的波形畸变问题日益严重, 电网中的谐波含量大幅增加^[1]。在低压供电系统中, 大多数采用三相四线制方式供电, 用户负荷被合理的分配到各相上, 但是由于负荷的随机变化使得各相上的负荷并不能保持对称, 从而导致会有较大的中线电流产生, 此时会产生大量的零序性 3 次谐波^[2]。由于其三相零序性电流幅值大小、初始相位均相同, 在中性线上产生叠加, 在严重的时候该中线电流甚至与相电流差不多, 引起电网内电压和电流的不平衡, 这种不平衡带来的“相位差”会产生损耗并导致用电效率的下降, 零序电流增大导致中性线过载、过热甚至火灾事故, 以及产生电磁干扰、影响供电电压波形、绝缘层破坏、降低功率因数、降低变压器及电器设备的使用寿命等问题, 同时也降低了电器的效率, 缩短了电器的使用寿命, 严重时会导致安全隐患^[3]。

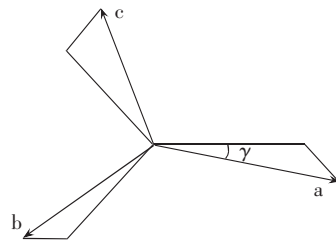
因此必须在三相不对称运行时减少零序性电流从而抑制系统的电压、电流不平衡和谐波。

1 Zig-zag 变压器的建模分析

曲折接线(Zig-zag)变压器是一种特殊接线结构的变压器, 利用绕组的相互交叉连接, 可以消除各相位间的电压和电流的不平衡, 维持控制其平衡性^[4-5]。这种特殊绕组, 可以相互补偿铁芯的磁通量, 最大限度地控制各相感应电动势的一致性, 从而保持三相平衡, 降低零序及三次谐波电流等额外损耗^[6-7]。图 1(a)是 Zig-zag 变压器的原理示意图。图 1(b)是二次侧的向量图。其中, 图 1 的 Zig-zag 变压器均是按照正序进行连接。



(a) 原理图



(b) 向量图

图 1 Zig-zag 变压器的示意图

Fig.1 Zig-zag transformer sketch map

下面以 A 相进行分析, 设 T_A 、 T_{a1} 、 T_{a2} 的匝数分别为 w_1 、 w_2 、 w_3 , 则其变比为 $k_{21} = w_2 / w_1$, $k_{31} = w_3 / w_1$, $k_{32} = w_3 / w_2$, 移相角 γ 与 w_2 、 w_3 的关系为

$$\sin \gamma / \sin (60^\circ - \gamma) = k_{32}$$

根据变压器的磁势平衡可以得到方程:

$$I_{TA} + I'_{Ta1} + I'_{Ta2} = 0 \quad (1)$$

其中, $I'_{Ta1} = k_{21} I_{Ta1}$ 为 I_{Ta1} 折算到 T_A 绕组的电流, $I'_{Ta2} = k_{31} I_{Ta2}$ 为 I_{Ta2} 折算到 T_A 绕组的电流, 而因为流过 T_{a1} 的电流和流过 T_{b2} 的电流满足: $I_{Ta1} + I_{Ta2} = 0$, 将其折算到 T_A 侧, 则有

$$I'_{Ta2} = -\frac{k_{21}}{k_{31}} I'_{Ta1} \quad (2)$$

因为

$$I_{Ta2}' = I_{Ta2}' \exp(-j120^\circ) \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1)可以得到:

$$I'_{Ta1} = k_{23} I'_{Ta2} \exp(-j60^\circ)$$

令

$$A = \exp(-j60^\circ)$$

则

$$I'_{Ta1} = -I_{TA} / (1 + k_{32}A), \quad I'_{Ta2} = -k_{32}A I_{TA} / (1 + k_{32}A)$$

当 $k_{21} = k_{31} = k_{32} = 1$ 时, $I'_{Ta1} = I'_{Ta2} = I'_{Ta1}$ 。

如果将该变压器的二次侧输出短路,考察其电关系则可以得到:

$$\begin{aligned} U_{Ta1} + U_{Ta2} &= 0, & U_{Ta1} &= k_{21} U'_{Ta1} \\ U_{Ta1} &= k_{31} U'_{Ta2}, & U_{Ta1} &= k_{32} U'_{Ta2} \exp(-j120^\circ) \end{aligned} \quad (4)$$

所以对于零序及 3 次谐波电流 Zig-zag 变压器相当于阻抗很低的通路,故 Zig-zag 变压器可使零序性电流经过曲折变压器而不再通过中性线,起到抑制零序电流和 3 次谐波的作用^[8]。通过上述的分析可知 Zig-zag 变压器具有下列特点:

a. 一次侧 Δ 连接可以将 3 次谐波电压消除;

b. 可提供三相四线制电源的不平衡电流回路,并且可以降低不平衡电压大小,且不平衡的电压大小只与绕组的内部阻抗成比例,因此可以抑制由不平衡负载所造成的影响;

c. 因为该变压器对于零序性电流阻抗很小,故可以减少系统中性线的电流含量,保持三相对称。

2 Zig-zag 变压器的仿真分析

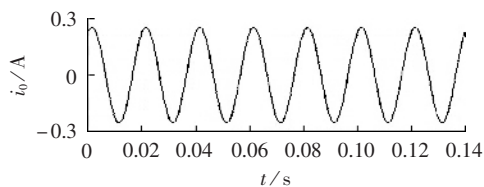
根据上述对 Zig-zag 变压器的建模分析可知该变压器对零序性电流具有较强的抑制能力,因此可利用该变压器抑制三相不对称系统中的零序及 3 次谐波。在 Matlab/Simulink 仿真环境中利用互感线圈构建了 Zig-zag 变压器的仿真模型,并针对三相不对称负载和三相不对称电源系统及整流 3 种情况仿真。

2.1 三相不对称负载情况

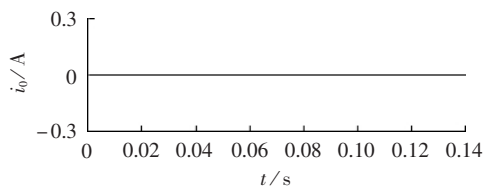
三相系统电压对称,有效值均为 220 V,频率为 50 Hz,负载采用电阻性负载,a 相电阻 50 Ω ,b 相和 c 相电阻为 25 Ω ,分别采用普通的变压器和 Zig-zag 变压器进行仿真(仿真电路略),考察中线电流。其中,Zig-zag 变压器各相 3 个绕组的电阻分别为 0.037 10 Ω 、0.323 30 Ω 和 0.286 28 Ω ,绕组线圈的自电感分别为 0.003 H、0.253 H 和 0.198 H,互电感分别为 0.029 H、0.026 H 和 0.224 H,仿真结果如图 2 所示。其中,图 2(a)为用普通变压器给三相不平衡负载供电时的中线电流,图 2(b)为用 Zig-zag 变压器给三相不平衡负载供电时的中线电流,通过仿真可知在负载不平衡时,Zig-zag 变压器可减少相应影响。

2.2 三相不平衡电源情况

三相电源分别为初相位为 0° 、 -120° 、 $+120^\circ$,a、b 相电压有效值 220 V,c 相电压有效值为 100 V,频率 50 Hz,负载均为 25 Ω 电阻性负载,采用与 2.1 节相同的仿真电路,考察其中线电流。仿真结果如图 3 所示,其中图 3(a)为用普通变压器在三相不平衡电源情况给负载供电时的中线电流,图 3(b)为用 Zig-zag 变压器在三相不平衡电源情况给负载供电时的中线电流,通过仿真可以知道在电源不平衡时,Zig-zag 变压器可以减少相应影响。



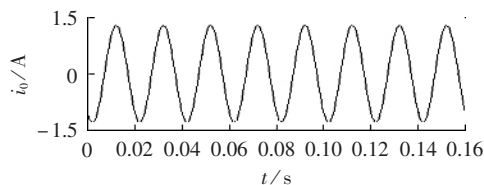
(a) 普通变压器供电时的中线电流



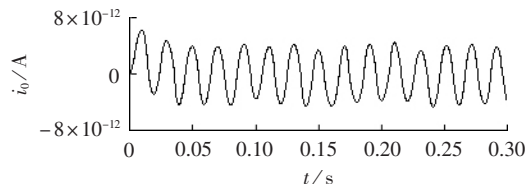
(b) Zig-zag 变压器供电时的中线电流

图 2 不对称负载的仿真系统

Fig.2 Simulation system of unbalance loads



(a) 普通变压器供电时的中线电流



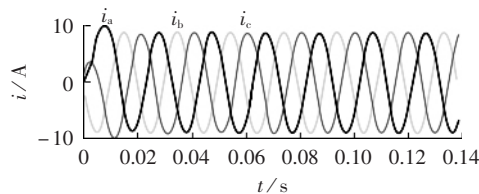
(b) Zig-zag 变压器供电时的中线电流

图 3 不平衡电源的仿真结果

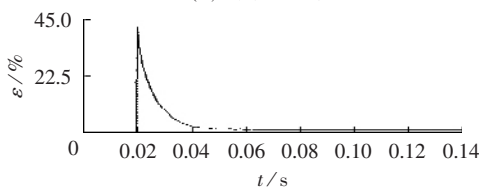
Fig.3 Simulation result of unbalance sources

2.3 采用 Zig-zag 变压器为整流变压器的仿真分析

图 4 为采用 Zig-zag 变压器作整流变压器的仿真结果(仿真电路略)由于 Zig-zag 变压器对于零序性电流呈现低阻抗特性,所以将其作为整流变压器可大幅地降低谐波含量,使系统侧电流的畸变降低^[9]。仿真参数为:系统电压有效值 220 V,频率 50 Hz,移相电抗器的参数同前所述,滤波电容 $C=1000 \mu\text{F}$,负载电阻 25 Ω ,电感 0.01 H。图 4(a)为系统电流波形,



(a) 系统电流波形



(b) 系统电流畸变率

图 4 Zig-zag 变压器在整流电路中应用的仿真结果

Fig.4 Simulation result of Zig-zag transformer applying in rectifier circuit

图 4(b)为系统电流畸变率,在系统运行稳定后,Zig-zag 变压器减少了零序性电流,使电流畸变大幅降低,系统电流的谐波成分减少。

3 结论

低压配电系统中非线性用电设备所产生的零序性电流会在中性线上叠加,使中线电流增大^[10]。通过对 Zig-zag 变压器的建模及仿真分析得知,Zig-zag 变压器作为一种特殊的连接方式的变压器对于零序性电流呈现低阻抗特性,在不对称系统中能相互补偿铁芯的磁通量,最大限度地控制各相感应电动势的一致性,从而保持三相平衡,降低零序及三次谐波电流等额外损耗,可以大幅减少中线电流,抑制谐波,提高供电质量。

参考文献:

- [1] 姜齐荣,赵东元,陈建业. 有源电力滤波器:结构.原理.控制[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 李国栋,冯力鸿,顾强,等. 曲折接线变压器抑制零序三次谐波电流方法研究[J]. 现代电力,2003,23(6):40-44.
LI Guo-dong,FENG Li-hong,GU Qiang,et al. Study of reducing zero - sequence third harmonics by Zig - zag transformer[J]. Modern Electric Power,2003,23(6):40-44.
- [3] KHERA P P. Application of Zig-zag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system[C]//Proceedings of Industry Applications Society Annual Meeting,IEEE,1990. Seattle,USA;IEEE,1990:1092-1096.
- [4] AREDES M,WATANABE E H. New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1995,10(3):1649-1656.
- [5] KAMATH G,MOHAN N,ALBERTSON D. Hardware imple -

- mentation of a novel reduced rating active filter for 3-phase,4 - wire loads[C]//Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition,IEEE,1995. Dallan,USA;IEEE,1995: 984-989.
- [6] DASTFAN A,PLATT D,GOSBELL V J. Design and implementation of a new three-phase four-wire active power filter with minimum components [C]//Industry Applications Conference, 1998(Thirty-Third IAS Annual Meeting)/The 1998 IEEE Conference Proceedings. St. Louis,MO,USA;IEEE,1998:1369-1376.
- [7] JIU Hurng-liahng,WU Jinn-chang,CHIANG Wen-jung,et al. Analysis of Zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1168-1178.
- [8] DAHONO P A,WIDJAYA R E,QAMARUZZAMAN S. A practical approach to minimize the zero - sequence current harmonics in power distribution systems[C]//IEEE Proc Power Conversion Conference. Nagaoka,Japan;IEEE,1997:683-6861.
- [9] 王凤翔,耿大勇. 移相电抗器对变流器供电系统谐波抑制的机理研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):54-57.
WANG Feng-xiang,GENG Da-yong. Study on harmonic repression of converter-fed power system by using phase-shifting reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(2):54-57.
- [10] 唐艳波. 10 kV 配电网单相接地电容电流补偿方式的研究[J]. 电力自动化设备,1999,19(4):52-55.
TANG Yan-bo. Study on compensation method of one-phase grounding capacitive current in 10 kV distribution net [J]. Electric Power Automation Equipment,1999,19(4):52-55.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

周 鹏(1965-),男,江苏南京人,主要从事电力系统自动化方面的工作;

郭忠文(1965-),男,山东聊城人,教授,博士研究生导师,主要从事设备状态检测及计算机网络方面的研究(E-mail: gouzhuw@ouc.edu.cn)。

Modeling and application of Zig-zag transformer

ZHOU Peng¹,GUO Zhong-wen²

(1. Guodian Nanjing Automation Co.,Ltd.,Nanjing 210003,China;

2. Ocean University of China,Qingdao 266100,China)

Abstract: As the zero-sequence harmonics of low-voltage distribution systems become more serious, Zig-zag transformer is used to attenuate the zero-sequence harmonic currents. The Zig-zag transformer analysis model is established on the basis of theoretical analysis. Simulative analysis is carried out for its applications to three-phase unbalanced load and three-phase unbalanced source, which indicates that, the flux of Zig-zag transformer can be counteracted when it operates under three-phase unbalance conditions and the electromotive forces of each phase is furthest controlled to keep three-phase balance and reduce zero-sequence current.

Key words: Zig-zag transformer; three phase unbalance; zero-sequence current; analysis model; simulation analysis