

PT 中性线断线的研究

刘东超¹, 李铁仲², 张哲¹, 沈军¹, 赵青春¹, 刘革明¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 北京市电力公司调度通信中心, 北京 100031)

摘要: 对 PT 中性线断线产生的三次谐波电压及基波零序电压进行了理论分析和实验验证, 并提出了实用判据。简述了对 PT 中性线断线研究的现状, 从基本的磁滞回线入手, 根据励磁电流、磁通、磁势之间的关系, 对 PT 中性线断线时的三次谐波产生的机理进行了理论分析, 对由不对称负载造成的零序基波电压进行了理论推导, 又通过大量的实验进行验证, 提出简单实用的判据, 并分析了可能受到影响的保护。对 PT 中性线断线的判据研究提供了理论依据。

关键词: 中性线断线; 三次谐波; 零序基波电压; 磁滞回线; 零序方向保护

Research on PT neutral line failure

LIU Dong-chao¹, LI Tie-zhong², ZHANG Zhe¹, SHEN Jun¹, ZHAO Qing-chun¹, LIU Ge-ming¹

(1. Nanjing Nari-relays Electric Co., Ltd, Nanjing 211102, China; 2. Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: When PT neutral line failure, the voltage of protection relay will be comprised of fundamental zero sequence voltage and third harmonic voltage. The paper does theoretical analysis and test for this case, and proposes a practical criterion. At first, the paper outlines the current research situation for PT neutral line failure. Based on the basic hysteresis loop, it discusses the reason for the third harmonic voltage from relationship among excitation current, magnetic flux, and magnetic potential. At the same time, it deduces the fundamental zero sequence voltage generated by unbalance load when PT natural line failure. Based on lots of tests and theoretical analysis, a simple and practical criterion is proposed and the protection which would be probably affected is analyzed. The paper provides the theoretical support for research on PT neutral line failure.

Key words: neutral line failure; third harmonic voltage; zero-sequence fundamental voltage; hysteresis loop; zero sequence direction protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0073-04

0 引言

电力系统中发生 PT 断线是一种常见的故障。PT 断线按断线的相别可分为中性线断线(N 线)和非中性线断线(ABC 线)。目前对非中性线断线的研究已经相当成熟, 保护装置可以根据零序电压和正序电压等条件来判断是否发生非中性线断线。但对中性线断线的研究却相对较少。当发生 PT 中性线断线时, 由于中性点电位漂移, 保护装置的相电压会发生变化, 从而可能导致零序方向元件误动^[1-3], 电压元件误动, 现场类似的事故发生过多次。

文献[4-5]提出当发生 PT 中性线断线时, 会产生三次谐波, 但未见其对三次谐波的产生机理进行深入研究。本文认为铁心的磁滞回线组, 即铁心材料的非线性会产生三次谐波电压, 而 PT 二次负载不对称会产生零序基波电压。本文对 PT 中性线断线时的三次谐波电压和零序基波电压产生机理深入

研究, 分析了可能受到影响的保护, 并进行了大量的实验验证, 进而提出了基于三次谐波的中性线断线检测判据。

1 三次谐波电压产生机理分析

电压从 PT 二次侧接入保护装置的小 PT 内, 其连接图如图 1 所示。

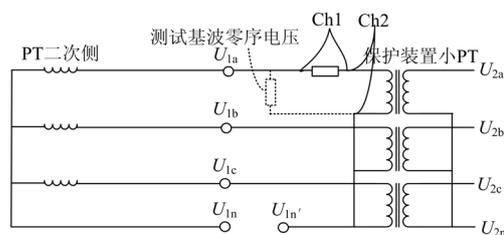


图 1 PT 断线示意图

Fig.1 PT failure chart

$U_{1a}, U_{1b}, U_{1c}, U_{1n}$ 为 PT 二次侧的电压输出; $U_{2a},$

U_{2b} , U_{2c} , U_{2n} 为保护装置小 PT 的二次电压输出, 供保护装置进行计算。

当发生 PT 中性线 (U_{1n} 线) 断线时, 由于 PT 一次侧的电压不会发生变化, 故 PT 二次侧的输出电压也不会发生变化, 即 U_{1a} , U_{1b} , U_{1c} 对 U_{1n} 的电压不会发生变化。但 U_{1a} , U_{1b} , U_{1c} 对 U_{1n} 的电压是否发生变化, 直接影响到 U_{2a} , U_{2b} , U_{2c} 对 U_{2n} 的电压。

由于保护装置小 PT 的二次负载很大, 相当于工作在空载状态, 故可按照 YY0 接的分相变压器对保护装置小 PT 进行分析。

在单相变压器原边加入 50 Hz 的标准正弦波, 由于空载, 原边的所加电压约等于感应电势, 即感应电势为正弦波。那么感应电势由磁通产生, 即磁通也为正弦波。磁通是由原边的励磁电流产生, 如果磁通和励磁电流为线性关系, 则励磁电流也为正弦波^[6]。

我们都知道铁心磁路是非线性的, 即铁心里的主磁通与励磁磁势 (或励磁电流) 的关系为一组非线性曲线, 即为磁滞回线组。那么要产生正弦波的磁通, 励磁电流就呈现了尖顶波, 对此尖顶波的励磁电流分解, 可得到基波和三次谐波^[7]。

即: 原边加入 50 Hz 正弦波的电压, 励磁电流将出现基波和三次谐波。

励磁电流的分析如图 2 所示。



图 2 单相变压器励磁电流特性分析

Fig.2 Analysis of excitation current of single transformer

在三相变压器的原边加入标准 50 Hz 的正序电压, 则励磁电流相差 120° , 由于铁心非线性, 各相的原边必然出现含有三次谐波的励磁电流, 且各相励磁电流中的三次谐波电流在时间上同相位^[8]。

如果有中性线, 三次谐波电流可以通过中性线流通, 各相的励磁电流就为尖顶波, 此励磁电流产生的磁通就为正弦波, 从而各相磁势为正弦波, 各相电压为正弦波。

如果中性线断线, 则各相中的三次谐波电流不能通过中性线流通。各相的励磁电流只剩下正弦波, 但由于磁路非线性, 正弦波的励磁电流产生平顶波的磁通。把这个平顶波的磁通分解, 可得到基波和三次谐波的磁通。把基波电势和三次电势合成, 得到相电势为一尖顶波。

故相电势中包含基波电势和三次谐波电势, 从而保护二次侧感受到有基波电压和三次谐波电压。

简而言之, 中性线断线, 导致保护装置小 PT 的原边的励磁电流中的三次谐波没有流通回路, 励磁电流基本为正弦波, 由于铁心非线性, 此励磁电流产生的磁通为平顶波。平顶波的磁通产生尖顶波的电势, 对此电势分解可得到基波电势和三次谐波电势, 进而保护装置会感受到三次谐波电压。

2 零序基波电压产生机理分析

实际的接线中, 往往 PT 二次侧会并接多个装置, 其负载会不平衡。当 PT 二次侧的负载不平衡时, 中性点的电压会漂移。

如图 3 所示: 假设 A 相阻抗并联上 Z_s 。

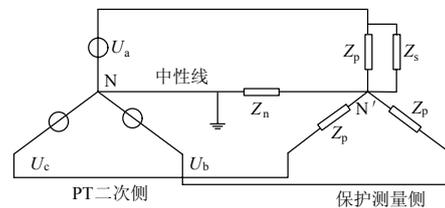


图 3 PT 二次侧等效回路图

Fig.3 PT secondary equivalent circuit

Z_p 为 PT 二次侧的各相输入阻抗, 应为 PT 二次侧各个装置对应相阻抗的并联。假设 A 相阻抗回路并联一个阻抗 Z_s , 来模拟负载不平衡。假设 PT 的输出电压为标准的正序电压。

根据电路的节点电压法可以求得 U_{nn} 的电压:

$$U_{nn} = \frac{U_a / (Z_p // Z_s) + U_b / Z_p + U_c / Z_p}{1 / (Z_p // Z_s) + 1 / Z_p + 1 / Z_p + 1 / Z_n} \quad (1)$$

当中性线断线时, Z_n 为无穷大。则

$$U_{nn} = \frac{U_a * Z_p}{Z_p + 3Z_s} \quad (2)$$

故当 Z_s 为无穷大时, 即三相负载平衡时, $U_{nn} = 0$; 当 Z_s 为 0 时, 即三相完全不对称, $U_{nn} = U_a$; 当 Z_s 在 $0 \sim \infty$ 之间变化时, U_{nn} 在 $0 \sim U_a$ 之间变化。

所以当 PT 二次侧的负载不平衡时, 会产生基波零序电压, 可能造成电压元件的误动。当发生区外故障时, 或是扰动时可能造成零序方向元件的误动。

3 实验验证

实验接线如图 1 所示。

$U_{1a}, U_{1b}, U_{1c}, U_{1n}$ 为 OMICRON 的 U_a, U_b, U_c, U_n 输出, 在 A 相中串入一个小电阻, 通道 1 测量电阻上的压降, 从而间接反映 A 相励磁电流。通道 2 测量绕组上的 A 相电压, 从而间接反映磁通, 从而可以得到不同电压下的磁滞回线组。通过保护装置的录波可以得到 U_{2a}, U_{2b}, U_{2c} 对 U_{2n} 的电压, 作为研究保护装置的判据的数据。在 A 相并联一个阻抗, 以模拟不平衡负载, 验证零序电压的产生。

实验步骤:

(a) 通过测量 A 相励磁电流和 A 相绕组电压, 可以验证当中线连接正常时, 励磁电流含有三次谐波, 绕组电压为正弦波; 当中性线断线时, 励磁电流为正弦波, 绕组电压含有三次谐波。

(b) 当发生 PT 中性线断线时, 测量保护二次侧电压的三次谐波含量, 以便提出实用判据。

(c) 在 A 相上并联一个阻抗, 当发生 PT 断线时, 测量保护二次侧的基波零序电压。

3.1 励磁电流、绕组电压及磁滞回线的测量

原边加入三相正序额定电压。励磁电流和绕组的波形及其频谱分析如图 4 所示, 图 4 (a) 为中性线连接正常时的波形图, 图 4 (b) 为中性线断线时的波形图。

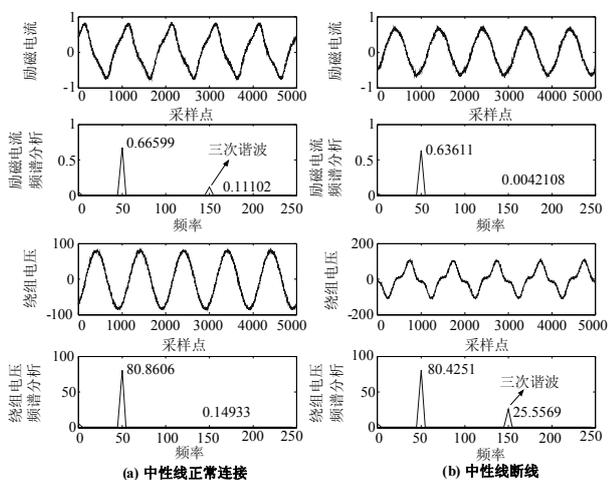


图 4 励磁电流和绕组电压波形图及其谐波分析

Fig.4 Excitation current and winding voltage waveform and harmonic analysis

当中性线连接正常时, 励磁电流呈现了尖顶波形状 (图 4(a)中的励磁电流图), 且含有较大的三次谐波 (图 4(a)中的励磁电流频谱分析图), 而绕组电压呈现标准正弦波。

当中性线断线时, 励磁电流基本为正弦波 (图 4(b)中的励磁电流图), 而绕组电压呈现了尖顶波形状, 含有较大的三次谐波 (图 4(b)中的绕组电压频谱

分析)。

由于绕组电压: $E = 4.44fN\dot{\Phi}_m$, \dot{E} 在相位上滞后 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$, 可以求得 $\dot{\Phi}_m$ 。

那么可以得到磁通 Φ 和励磁电流 i 的磁滞回线, 图 5 为绕组电压为 57.74 V 和 30 V 时的磁滞回线组。

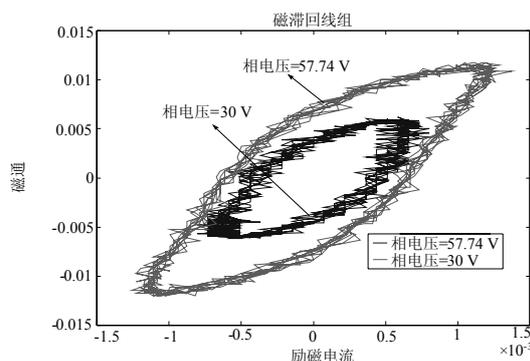


图 5 磁滞回线组

Fig.5 Hysteresis loop group

可见, 在不同的绕组电压下会形成不同的磁滞回线。由于铁磁材料的磁滞和涡流等影响, 即使最大磁通没有工作在饱和状态, 励磁电流和绕组电压也不是线性关系。

即一旦发生了 PT 中性线断线, PT 二次侧的电压一定会含有三次谐波。

3.2 保护装置小 PT 二次侧电压的三次谐波含量

由上文分析可知, 当发生 PT 断线时, 进入保护装置的小 PT 原边的电压会出现三次谐波, 而副边的电压通过数据比较很容易发现, 副边电压真实地反映了原边电压, 出现了三次谐波。

表 1 为原边加不同的对称电压时, 副边相电压的三次谐波含量值。

表 1 保护装置小 PT 副边相电压的三次谐波含量值

Tab.1 The 3rd harmonic of secondary PT side voltage

原边 原边电压(% U_n)	副边相电压		
	50 Hz(V)	150 Hz(V)	150 Hz /50 Hz (%)
100%	80.3	23.6	29
90%	72.2	19.2	26.7
80%	64.1	15.2	23.6
70%	56.0	11.5	20.6
60%	48.0	8.48	17.6
50%	40.0	6.01	15.0

可见, 相电压中的三次谐波含量的大小随原边的电压基本成线性关系。故可根据基波电压的幅值动态调整三次谐波的阈值。

3.3 保护装置小 PT 二次侧的基波零序电压

在 A 相上并联一个阻抗，当发生 PT 断线时，保护二次侧的电压波形及相位如图 6 所示。

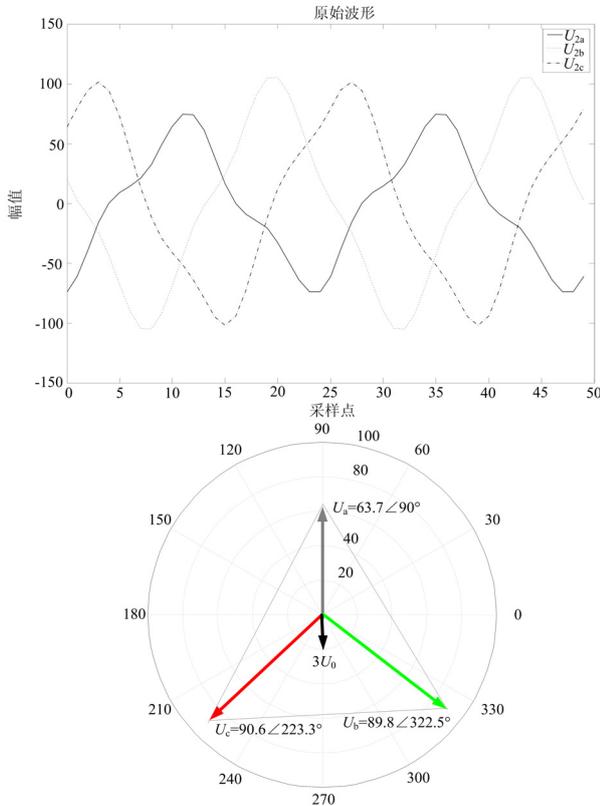


图 6 保护二次侧不平衡电压及零序基波电压

Fig.6 Unbalance voltage and zero fundamental voltage of PT secondary side

从图 6 中可以看出，A 相电压降低，BC 相电压升高。但是线电压仍然相等，中性点电压发生了漂移，产生了基波零序电压。

过电压和低电压保护可能发生误动。当发生区外故障或是扰动时，可能导致用到零序电压的保护（如零序方向保护）发生误动。

4 实用判据及影响

由于各相电压的三次谐波在时间上同相位，故零序电压的三次谐波值为 3 倍的相电压的三次谐波值，其三次谐波含量最大。可采用零序电压中的三次谐波值进行判断。

系统正常运行时，零序电压很小，其三次谐波含量也很小。当发生接地故障时，虽然有零序电压，但零序电压的三次谐波含量一般很小。当发生 PT 中性线断线时，零序电压中的三次谐波会很大。

故可采用当零序电压中的三次谐波大于一定门

槛时，经一定延时，判为 PT 中性线断线。

当判断出 PT 中性线断线时，需要调整可能受影响的保护元件，如零序方向元件，过电压元件，低电压元件等。

5 结论

(1) 由于铁磁材料的磁滞和铁损等原因，当 PT 中性线连接正常时，原边的励磁电流中总会存在三次谐波，以维持绕组电压为正弦波电压。当 PT 中性线断线时，励磁电流中的三次谐波电流没有流通回路，导致绕组电压发生畸变，出现三次谐波。

(2) 当发生 PT 中性线断线时，如果 PT 二次负载不平衡，则中性点电位漂移，会产生零序基波电压。

(3) 保护装置可根据零序电压中的三次谐波含量，检测 PT 中性线断线，并调整可能受到影响的保护，如零序方向保护，过电压保护，低电压保护等。

参考文献

[1] 刘玮, 姚斌, 秦红霞. 一起零序方向保护误动事故的分析对策[J]. 广东电力, 2008(11): 61-64.
LIU Wei, YAO Bin, QIN Hong-xia. Analysis of Maloperation of Zero-sequence Direction Protection and Countermeasures There Against[J]. Guangdong Electric Power, 2008(11): 61-64.

[2] 阮伟, 刘启胜, 徐挺进. 保护用电压互感器二次接线方式的探讨[J]. 继电器, 2004, 32(19): 49-55.
RUAN Wei, LIU Qi-sheng, XU Ting-jin. Discussion on Secondary Protection Connection Mode of Potential Transformer[J]. Relay, 2004, 32(19): 49-55.

[3] 阮伟, 郭文彤, 刘启胜. 试析电压互感器接线方式对零序方向保护之影响[A]. 2003 年全国高等学校电力系统及其自动化专业第十九届学术年会[C]. 成都: 2003.

[4] 陈水耀, 姚仲焕. 电压回路中性线对方向保护的影响分析和防范措施[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 80-82.
CHEN Shui-yao, YAO Zhong-huan. Analysis and Measures of Influence of the Common Connection Line on Zero-sequence Direction Protection[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 80-82.

[5] 徐振宇, 赵志宏. 线路保护装置利用三次谐波检测中线断线的新方法[A]. 第十一届全国保护和自动控制学术研讨会论文集[C]. 武汉: 2007. 38-40.

[6] 黄东山, 刘南平. 三次谐波激磁电流在变压器组中的作用[J]. 广西电力技术, 2001(3): 9-12.
HUANG Dong-shan, LIU Nan-ping. The Effect of 3rd Harmonic Exciting Current on Three Phase Transformers[J]. Guangxi Electric Power Technology, 2001(3): 9-12.

(下转第 81 页 continued on page 81)

- 功率控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4):87-93.
- HUANG Shou-dao, WANG Yao-nan, WANG Yi, et al. A Study of Active and Reactive Power Control for Brushless Doubly-fed Machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 87-93 (in Chinese).
- [3] 王琦, 陈小虎, 纪延超, 等. 同步坐标下的无刷双馈风力发电机控制系统[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(6): 673-678.
- WANG Qi, CHEN Xiao-hu, JI Yan-chao, et al. Control System in Brushless Doubly-fed Wind Power Generation System Based on Synchronous Reference[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2006, 30(6): 673-678 (in Chinese).
- [4] 王琦, 陈小虎, 纪延超, 等. 基于双同步坐标的无刷双馈风力发电系统的最大风能追踪控制[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 82-87.
- WANG Qi, CHEN Xiao-hu, JI Yan-chao, et al. Maximal Wind Energy Tracing Control for Brushless Doubly-Fed Wind Turbine Based on Dual Synchronous Coordinates [J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 82-87(in Chinese).
- [5] McMahan R A, Roberts P C, Wang X, et al. Performance of BDFM as Generator and Motor[J]. IEE Proc-Elects Power Appl, 2006, 153(2).
- [6] Roberts W X, McMahan P C, R A. Studies of Inverter Ratings of BDFM Adjustable Speed Drive or Generator Systems[A]. in: Power Electronics and Drives Systems[C]. 2005.
- [7] Jovanovic M G, Betz R E. Power Factor Control Using Brushless Doubly Fed Reluctance Machines[A]. in: Industry Applications Conference[C]. 2000.
- [8] HUANG Shou-dao, Huang Kewan, Zhou Lawn, et al. A Study of the Control Strategy on Rotor Field Orientation for Brushless Doubly-Fed Machine[A]. in: Power Electronics and Motion Control Conference[C]. 2000.508-513.
- [9] Izaskun Sarasola, Javier Poza, Miguel Angel Rodriguez, et al. Direct Torque Control for Brushless Doubly Fed Induction Machines[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007:1496-1501.
- [10] Domenico Casadei, Francesco Fiofumo, Giovanni Serra, et al. FOC and DTC: Two Virable Schemes for Induction Motors Torque Control[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(5): 779-787.
- [11] 刘晓鹏, 张爱玲, 樊双英. 无刷双馈电机直接转矩控制策略的研究[J]. 微特电机, 2006(3): 25-31.
- LIU Xiao-peng, ZHANG Ai-ling, FAN Shuang-ying. Study on the Strategy of Direct Torque Control for Brushless Doubly-fed Machines[J]. Micro Motor, 2006 (3): 25-31.
- [12] 李夙. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 35-50.
- LI Su. Direct Torque Control for Induction Machines [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. 35-50.
- [13] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 156-174.
- YE Hang-ye. The Control Technology for the Wind Turbine, Second Edition[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 156-174.

收稿日期: 2009-03-15; 修回日期: 2009-04-25

作者简介:

刘伟(1983-), 男, 硕士研究生, 现从事电力系统设计工作; E-mail: liuwei2@gedi.com.cn

沈宏(1972-), 男, 讲师, 研究方向为电工学理论与电力系统测量与控制;

高立刚(1982-), 男, 硕士研究生, 现从事电力系统设计工作。

(上接第 76 页 continued from page 76)

- [7] 周鹗. 电机学[M].北京: 水利电力出版社, 2008.
- [8] 原治安. 电压互感器断线原理与应用[J]. 电子自动化设备, 2009, 29(8): 153-156.
- YUAN Zhi-an. Principle and Application of Loss-of-potential Logic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 153-156.

作者简介:

刘东超(1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统开关保护等研究; E-mail: liudc@nari-relays.com

李铁仲(1960-), 男, 学士, 工程师, 从事电力系统继电保护;

张哲(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护。

收稿日期: 2009-11-17; 修回日期: 2009-12-17