

DOI: 10.7500/AEPS20130831009

基于能量信息的变压器励磁涌流识别方法

黄少锋, 申洪明, 刘 欣, 赵 远

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京市 102206)

摘要: 目前电力变压器差动保护的主要问题仍是如何准确识别励磁涌流与内部故障。励磁涌流中包含大量谐波分量,各谐波分量除幅值、频率信息之外还包括能量信息。文中基于 Prony 算法给出了一种能量表达式,在此能量表达式下发现变压器内部故障时基波的能量与二次谐波能量之比远大于励磁涌流时基波能量与二次谐波能量之比,因此可以利用此特征区分励磁涌流和内部故障。最后仿真验证了该方法的有效性及其与传统识别方法相比所具有的优势。

关键词: Prony 算法; 内部故障; 励磁涌流; 谐波能量; 变压器; 差动保护

0 引言

电力变压器是电力系统中十分重要的供电设备,变压器发生故障将对供电的可靠性和系统的正常运行带来严重的影响,因而人们对变压器保护进行了大量研究。但变压器保护的正确动作率一直不太理想。对于目前普遍应用的变压器差动保护而言,如何有效避免励磁涌流引起的差动保护误动一直是研究的热点^[1-6]。

现有的励磁涌流识别方案包括二次谐波制动原理和间断角闭锁原理^[1]。但这两种方案都存在弊端,如系统中二次谐波含量减小时,将导致二次谐波制动原理失效;随着无功补偿装置的影响,变压器内部故障时,二次谐波含量可能达到 15% 左右。另外某些情况下,三相涌流的间断角将会消失或者变得很小,也会导致基于间断角原理的涌流闭锁算法灵敏度下降。

本文基于 Prony 算法给出了一种能量表达式,在此表达式下变压器在不同状态下各次谐波分量的能量有很大的差异。其中,内部故障时基波的能量与二次谐波能量之比远大于励磁涌流时基波能量与二次谐波能量之比。通过设定一个合理的门槛值,利用基波能量与二次谐波能量之比就能很好地识别出励磁涌流和内部故障。该方法在励磁涌流二次谐波较低、内部故障二次谐波较高时也能正确识别。

1 新判据的基本原理

1.1 不同工况下电流特征分析

相对于基波而言,幅值方面,当变压器发生励磁

涌流时,其二次谐波的幅值较大;内部故障时二次谐波幅值较小。衰减速度方面,励磁涌流时二次谐波的衰减速度与基波的衰减速度相当^[6];而内部故障时二次谐波衰减速度远远大于基波的衰减速度。基于上述特点提出了二次谐波制动原理。但二次谐波制动原理仅比较二次谐波与基波的幅值,并未对衰减速度进行比较。

通过上面的分析可以看出,励磁涌流时二次谐波无论在幅值还是衰减速度方面都与内部故障时相差较大。因此构建一个既包含幅值信息,又包含衰减信息的指标,将会更加容易区分励磁涌流和内部故障。下面基于 Prony 算法构建能量表达式,利用能量的信息识别励磁涌流和内部故障。

1.2 Prony 算法

Prony 算法的基本原理是使用一系列指数函数的线性组合来描述等间隔采样数据的数学模型,非常适合分析电力系统暂态变量,已在电力系统中得到广泛应用^[7]。Prony 算法采用的数学模型为一组 p 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数,其离散时间的数学形式为^[8]:

$$x'(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \tag{1}$$

$$b_i = A_i e^{j\theta_i} \tag{2}$$

$$z_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t} \tag{3}$$

式中: $n=0,1,\cdots,N-1,N$ 为一周期采样点数; b_i , z_i 为复数; f_i 为信号频率,既可以是 50 Hz 的整数倍,也可以是非整数次倍; Δt 为采样间隔; A_i, θ_i, α_i 分别表示信号的幅值、相位、衰减因子。全周期傅里叶算法中除衰减的直流分量外,认为其余分量的 α_i 都为 0,即其余的分量都是不衰减的,但 Prony 算法

认为其余分量也是衰减的。因此,Prony 算法更加准确。 $f_i, A_i, \theta_i, \alpha_i$ 可以通过一定的算法分别予以求解,限于篇幅,在此不再赘述。

定义能量 E_i 的大小为:

$$E_i = A_i^2 \sum_{n=0}^{N-1} (e^{\alpha_i n \Delta t})^2 \quad (4)$$

式(4)中的未知量可以通过 Prony 算法求出^[9]。通过式(4)可知,能量不但与信号的幅值有关,而且与信号的衰减因子有关,是一个关于时间的累积量,本文定义其为具有能量信息的无量纲变量。

2 新的涌流识别方法的提出

为了说明运用 Prony 算法拟合波形的准确度,引入 2 个指标来表示拟合的结果是否理想,即信噪比 S_{NR} 和动态变化率 D_{VR} ^[8],有

$$S_{NR} = 20 \lg \frac{\text{rms}(x(n))}{\text{rms}(x'(n) - x(n))} \quad (5)$$

$$D_{VR} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |x'(n) - x(n)|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |x'(n) - x(0)|^2} \quad (6)$$

式中: rms 为求均方根值函数; $x(n)$ 为原始波形的采样数据; $x'(n)$ 为拟合波形的数据。

一般来说, S_{NR} 越大越好。当 S_{NR} 大约为 20 dB 表示拟合结果是可以接受的,如果 S_{NR} 大于 40 dB 就可以认为结果是理想的。 D_{VR} 越小越好,一般认为小于 1% 即可。

由式(4)可知,能量的大小与信号的幅值和衰减速度都有关。在幅值上,与内部故障相比,励磁涌流时二次谐波的数值很大;在衰减速度上,内部故障时基波衰减的速度很慢,而二次谐波衰减的速度很快;励磁涌流时基波和二次谐波衰减速度相当。

因此,发生励磁涌流时,基波与二次谐波的能量相差不大;内部故障时,基波与二次谐波的能量相差较大。所以可以用基波能量与二次谐波能量的比值构成一个新的判据来识别励磁涌流。

在新的判据中,设定一个门槛值,当基波能量与二次谐波能量之比大于门槛值时,判为内部故障;当比值小于门槛值时,判为励磁涌流。新的判据如下:

$$\begin{cases} \frac{E_1}{E_2} > C & \text{内部故障} \\ \frac{E_1}{E_2} \leq C & \text{励磁涌流} \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_1 为基波能量; E_2 为二次谐波能量; C 为门槛值。

在特殊工况下,励磁涌流时二次谐波的含量可能相对较低,而内部故障时二次谐波含量相对较高。但励磁涌流时二次谐波衰减较慢,而内部故障时二次谐波衰减速度很快。考虑到能量不仅仅与幅值有关,而且也与衰减速度相关,所以励磁涌流时二次谐波能量与基波能量的比值仍然大于内部故障时二次谐波与基波的比值。即在对保护最不利的工况下,新判据仍然成立。

3 MATLAB 仿真分析

3.1 仿真模型

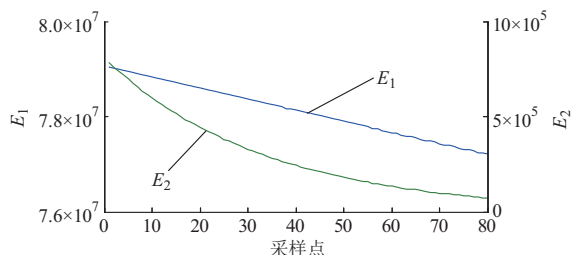
本文基于 MATLAB 进行仿真实验。仿真模型如图 1 所示。变压器为饱和三相变压器,接线方式为 YNd11。变压器参数:额定容量 180 MVA,额定电压 220 kV/10 kV,一次侧和二次侧的电阻的标幺值为 0.005,电感的标幺值为 0.01。拟合时间从故障或者涌流发生的时刻开始,拟合点数为一个周期,即每次计算的数据窗长为 20 ms。考虑到涌流时二次谐波可能较小和内部故障时二次谐波可能较高的情况,并结合大量的仿真实验,取门槛值 $C = 150$ 较为合适。



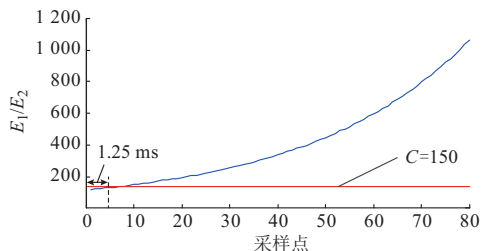
图 1 仿真模型
Fig.1 Simulation model

3.2 内部故障时仿真分析

图 2 是在以下参数下形成的关系曲线: $A_1 = 1 \text{ kA}$, $A_2 = 0.17 \text{ kA}$, $\alpha_1 = -0.6$, $\alpha_2 = -60$, $N = 80$ 。



(a) 基波与二次谐波能量曲线



(b) E_1/E_2 的关系曲线

图 2 内部故障时新判据的应用
Fig.2 Application of new criterion in internal fault

图 2(a)表示的是数据窗按采样点逐步后移 1 个周期时间内所计算得到的基波和二次谐波的能量;图 2(b)表示的是相应的基波与二次谐波能量的比值。通过图 2(b)可以看出,刚开始的几个数据窗内,由于二次谐波幅值较大,导致 $E_1/E_2 < C$, 所以表现出了涌流的特征,但经过大约 1.25 ms 后就满足内部故障判据的要求,进而开放保护(经计算利用谐波制动大约需要 2 ms 才能开放保护)。而且两者的比值随着数据窗的移动会越来越大,使得判据更容易满足。

通过上面的分析可以得出,内部故障时即使二次谐波含量超过谐波制动的整定值 15%,但由于能量与衰减速度有关,所以 E_1/E_2 的幅值仍然较大;而且由于二次谐波的衰减速度比基波的要快,所以随着时间的推移,基波与二次谐波能量的比值逐步增大,从而使得判据更容易满足。

3.3 励磁涌流时仿真分析

同理,对于励磁涌流,如果二次谐波含量低于门槛值,但由于其衰减速度与基波相当,所以基波能量与二次谐波能量之比仍然会满足励磁涌流的判据。

图 3 是在以下参数中形成的关系曲线: $A_1 = 1 \text{ kA}$, $A_2 = 0.12 \text{ kA}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = -10$, $N = 80$ 。通过图 3(b)可以看出,虽然二次谐波的含量仅占基波的 12%,但 E_1/E_2 大约为 70,所以基于能量的观点仍然能做到正确识别励磁涌流。事实上,当 $C = 150$ 时,励磁涌流二次谐波含量即使只占基波分量的 8%左右时,新的判据也能正确识别。

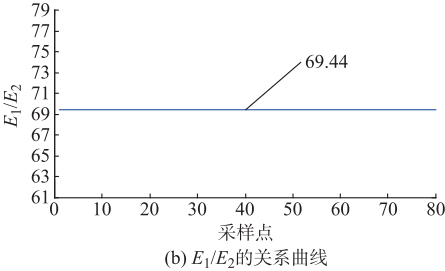
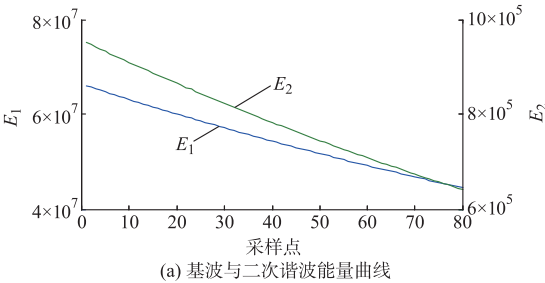


图 3 励磁涌流时新判据的应用

Fig.3 Application of new criterion for inrush current

附录 A 表 A1 列出了变压器在各种主要内部故障情况下的仿真结果;表 A2 列出了变压器在不同的合闸角与剩磁情况下,发生励磁涌流时的仿真结果。需要指出的是表 A2 中组别 5 的 B 相差流是对称性涌流。 β 为合闸角; B_r/B_m 为剩磁与最大磁通的比值。

由表 A1 可以看出,一般情况下,变压器发生各种内部故障时,基波能量较大,二次谐波能量较小,因此两者的比值很大。特别是随着分析时间的增大,基波的能量变化不大,而二次谐波由于衰减速度很快,所以其能量值随着分析时间的延长变小,更容易使内部故障的判据得到满足;同时由表 A1 也可以看出内部故障有时并不存在二次谐波分量,所以当发现差流中不存在二次谐波时,则可以直接判为内部故障。

由表 A2 可以看出,在各种情况下发生励磁涌流(包括对称性涌流),此时基波能量与二次谐波能量相差不大,两者的比值较小。并且由于两者的衰减速度几乎相当,因此随着时间的延长,两者的比值变化不大。通过以上分析可以得到基于能量制动差动保护的逻辑图,如图 4 所示。

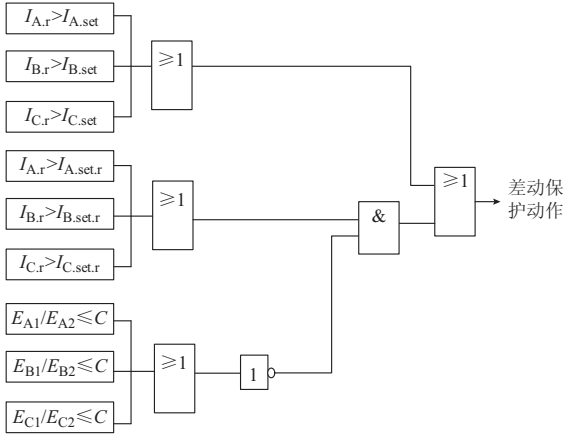


图 4 基于新判据差动保护逻辑图
Fig.4 Logic diagram based on new criterion

图中, $I_{\varphi.r} > I_{\varphi.set}$ (φ 取 A, B, C 三相)表示某相差动电流速断继电器; $I_{\varphi.r} > I_{\varphi.set.r}$ 表示某相带有制动特性的差动继电器; $E_{\varphi1}/E_{\varphi2} \leq C$ 表示某相能量制动元件。

4 结论

1) Prony 算法处理暂态信号的独特优势决定了新的识别方法受暂态量的影响较小,在暂态量较大的情况下能够快速正确地识别励磁涌流。

2) 由于能量表达式不仅仅是幅值的函数,也是

衰减速度的函数,与谐波制动百分数 15% 而言,当内部故障二次谐波较大时或者励磁涌流二次谐波较小时也能正确识别。

3) 随着时间窗的移动,判据会更容易得到满足。新的判据不受间断角的影响,对于对称性涌流也能正确识别。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 潘书燕,郑玉平,吴崇昊,等.变压器新型励磁涌流识别元件[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):63-67.
PAN Shuyan, ZHENG Yuping, WU Chonghao, et al. A new identification component for inrush current of power transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 63-67.
- [2] 尤夏,张艳霞.波动误差结合峰-峰间距法识别励磁涌流[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):36-39.
YOU Xia, ZHANG Yanxia. Recognition of transformer inrush current based on combination of fluctuation error and peak-to-peak space method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 36-39.
- [3] 李贞,张明珠,倪传坤,等.变压器励磁涌流的自适应二次谐波分相制动力方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):121-124.
LI Zhen, ZHANG Mingzhu, NI Chuankun, et al. An adaptive secondary harmonic split-phase restraint scheme for magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 121-124.
- [4] 刘世明,许志成,李森林,等.基于相空间的励磁涌流新特征分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):134-138.

- LIU Shiming, XU Zhicheng, LI Senlin, et al. A novel characteristic of magnetizing inrush current based on phase space [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 134-138.
- [5] 王雪.基于 Prony 分析的励磁涌流识别方法[J]. 继电器,2007, 35(6):1-5.
WANG Xue. A method to discriminate inrush current based on Prony analysis[J]. Relay, 2007, 35(6): 1-5.
- [6] 骆健,吴翌明,丁大德.一种高可靠的自适应励磁涌流制动方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):80-83.
LUO Jian, WU Gangming, DING Dade. A high reliable adaptive inrush current restraint principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 80-83.
- [7] 徐东杰,贺仁睦,高海龙.基于迭代 Prony 算法的传递函数识别[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):40-43.
XU Dongjie, HE Renmu, GAO Hailong. Transfer function identification using iterative Prony method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 40-43.
- [8] 熊俊杰.基于 PMU 的低频振荡 Prony 分析和本地在线监测系统[D]. 南京:东南大学,2006.
- [9] HAUER J F, DEMEURE C J, SCHARF L L. Initial results in prony analysis of power system response signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 5(1): 80-90.

黄少锋(1958—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护与控制。

申洪明(1988—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: shen198806@126.com

刘欣(1987—),女,博士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。

(编辑 代长振)

A Novel Identification Criterion for Inrush Current Based on Energy Information

HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Xin, ZHAO Yuan

(State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The main problem for transformer protection is still how to identify inrush current. Inrush current contains a lot of harmonic components and some useful information is found in these harmonics, such as the magnitude, frequency and energy. The paper puts forward an expression for energy of a certain component based on Prony algorithm. It is found that the ratio of fundamental energy to second harmonic energy in the internal fault current is much larger than that in the inrush current. Thus a novel method is proposed to discriminate the inrush current from the internal fault current. Simulation results show that the method is effective and has better performance than the traditional methods.

Key words: Prony algorithm; internal fault; inrush current; harmonic energy; transformer; differential protection