

强干扰环境下外加故障诊断信号的选取与检测

潘贞存, 丛伟, 丁磊, 张帆

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 利用外加信号对电气设备进行在线故障诊断、绝缘监视和参数监测的技术在近几年得到了较快的发展。由于与电气设备本身的高电压、大电流相比, 外加信号的量值很小、能量和信噪比都很低, 所以外加信号的加入和检出是这些技术应用的主要难点。在分析的基础上, 提出了外加信号应不同于任何一种固有信号选取的原则, 导出了一种适合于数字式处理、能够从强干扰环境下灵敏可靠地检测出外加信号的处理方法, 给出了应用的实例。

关键词: 注入信号; 故障诊断; 检测; 信号处理

Detection of injected diagnosis signal in high interference condition

PAN Zhen-cun, CONG Wei, DING Lei, ZHANG Fan

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The signal injection based techniques of on-line fault diagnosis, insulation monitoring, and parameter measurement of electrical devices have been developed quickly in recent years. Compared with the high voltage and large current of the primary equipment, the magnitude of signal voltage and current is considerably small. Detection of the small signal in the high interference condition is the main technical barrier to use the technique. The consideration and principle to select the injecting signal is discussed in the paper. A method, which is suitable for digital processing and can easily separate out the injected signals from high interference condition, is deduced. Application example of the technique is presented.

Key words: signal injection; fault diagnosis; detection; signal processing

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)05-0013-03

0 引言

近年来, 利用外加信号对电气设备进行在线故障诊断、绝缘监视和参数监测的技术得到了广泛的重视和较快的发展。到目前为止, 已有利用外加电源的发电机定子接地保护^[1,2]、利用注入信号的小电流接地系统单相接地故障选线与定位保护^[3]、利用外加变频信号的消弧线圈自动跟踪补偿装置^[4]、利用外加信号的电力电缆的在线绝缘监视装置^[5]、利用外加信号的直流系统接地检测装置^[6]等多种利用外加信号的技术问世, 不少技术已经得到较为广泛的应用, 取得了很好的应用效果。

对电气设备进行在线故障诊断、绝缘监视和参数监测的主要难点, 就是与电气设备本身的高电压、大电流相比, 外加信号不仅量值很小、而且能量很低, 有用检测信号淹没在强大的干扰信号之中, 信

噪比极低。针对这种情况, 本文提出了外加信号应不同于任何一种固有信号选取的原则, 导出了一种适合于数字式处理、能够从强干扰环境下灵敏可靠地检测出外加信号的处理方法, 给出了应用的实例。

1 外加检测信号的选取

外加信号一般是由电子电路构成的信号源发出的, 由于受电子电路容量的限制, 信号的幅值和能量都很小, 与电力系统中的任何一种固有信号相比, 它都十分微弱。为了能够在极低的信噪比下检测出外加的信号, 使有用信息(即注入信号)不被干扰信号(即电气设备的运行电压电流)所掩盖, 外加注入信号应该不同于电力系统中的任何一种固有信号, 具有与它们都不同的特征。

在稳态的情况下, 电力系统一次电气设备上的电压电流主要为 50 Hz 的工频量和各种整数次的谐

波量, 在个别的情况下, 还可能存在着能量较低的分数次间谐波量。

暂不考虑间谐波的存在, 假设设备的运行电压电流仅有工频和各次谐波组成, 这时, 选取外加注入信号的基波频率介于工频 N 与 $N+1$ 次谐波之间 (N 为自然数), 即:

$$N \cdot f_1 < f_{\text{sig}} < (N+1) \cdot f_1 \quad (1)$$

式中: f_1 为工频信号的频率; f_{sig} 为外加注入信号的基波频率。

就可以避免外加的信号被固有的信号所掩盖, 也就可以设法从包含大量干扰的信号中检测出有用的信息。

考虑间谐波存在时, 由于间谐波的频率也是介于工频的 N 与 $N+1$ 次谐波之间, 可能与外加信号频率相同或相近, 从而对注入信号产生干扰, 使其无法从干扰信息中析出。此时可以采用编码注入的方式, 来消除其影响。

编码注入时注入信号的频率仍按式 (1) 选取, 不同之处是不再连续地注入, 而是以一定的编码断续地注入。最简单的编码就是占空比为 50% 的方波信号, 高电平时启动注入, 而低电平时停止注入。如图 1 所示。

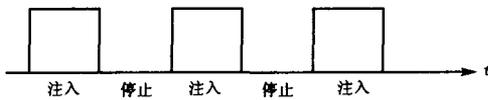


图 1 编码注入的示意图

Fig.1 Illustration of coded signal injection

在有信号注入时检测到的为注入信号与间谐波的合成量, 而停止注入时检测到的仅为间谐波, 两者相减或通过其他的信号处理方式就可以消除间谐波的影响。为使注入信号稳定且有足够的时间进行检测, 调制用方波的周期不宜过短, 以半波时间不小于 1 s 为宜。

2 外加注入信号的检测

注入信号频率的选取, 除了应满足式 (1) 的要求外, 还应该考虑便于检测和数字化处理。

对于注入信号的分析 and 计算而言, 工频及各次谐波信号均为干扰信号, 在进行运算时应设法滤去。为了能够用数字的方法对基波及谐波成分进行处理, 防止叠频现象的发生, 系统的采样频率应该首先满足采样定理, 即必须大于信号所含最高次谐波频率的两倍; 其次, 为了便于信号处理, 应使采样频率为工频频率的整倍数, 且尽量为偶数次倍

数。即采样频率 f_s 应选为

$$f_s = P \cdot f_1 \quad (2)$$

式中: f_1 为工频基波的频率; P 为大于信号中所含最高次谐波次数 H 两倍的偶数, 可取为 $P = 2H + 2$ 。

考察差分滤波公式

$$y(n) = x(n) - x(n - P) \quad (3)$$

其幅频特性为

$$A(\omega T_s) = 2 \left| \sin \frac{P\omega T_s}{2} \right| \quad (4)$$

对应的幅频响应曲线如图 2 所示。

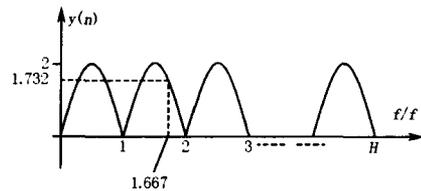


图 2 差分滤波器的频率特性

Fig.2 Frequency response of the differential digital filter

从图 2 可以看出, 它对于基波及 $2 \sim H$ 次的各次谐波的响应都为 0, 即在稳态情况下能够将基波分量和 $2 \sim H$ 的各次谐波滤除。

为了便于用数字的方法对注入信号进行处理和运算, 希望对注入信号每个基波周期的采样点数也为整数, 即

$$f_s = Q \cdot f_{\text{sig}} \quad (5)$$

式中: f_{sig} 为注入信号的频率; Q 为大于 2 的正整数, 一般应为偶数。

将式 (5) 变换后代入式 (4) 中, 可以求出式 (3) 对应的差分滤波器对注入信号 f_{sig} 的响应。

$$A(\omega_{\text{sig}} T_s) = 2 \left| \sin \frac{P\omega_{\text{sig}} T_s}{2} \right| = 2 \left| \sin \frac{P \cdot 2\pi \frac{f_s}{Q} T_s}{2} \right| = \quad (6)$$

$$2 \left| \sin \frac{P \cdot \pi}{Q} \right|$$

只要 P 、 Q 之比不为整数, 滤波器对注入信号的响应就不为 0。即经过式 (3) 的滤波后, 工频及整数次谐波均可以消除, 而注入信号不会被滤掉。

由式 (6) 可以看出, 当 P 、 Q 之间的比值为 $I + \frac{1}{2}$ (I 为自然数) 时, 式 (3) 对注入信号有最大的响

应, 而当两者之间的比值接近整数时, 幅频响应就比较小。

综合上述的式(1)、式(2)和式(5)式, 注入信号的基波频率应该取为:

$$\begin{cases} N \cdot f_1 < f_{\text{sig}} < (N+1) \cdot f_1 \\ f_{\text{sig}} = \frac{P}{Q} \cdot f_1 \end{cases} \quad (7)$$

对于不同的应用, N 、 P 和 Q 可取为不同的值。只要满足式(7)的关系, 就可以保证每个工频周期和注入信号周期内采样的点数都是整数, 且应用式(3)进行数字滤波时, 可以消除工频及各次谐波, 注入信号得以保留。

差分滤波后, 为进一步强化注入信号, 消除其他频率成分的干扰, 可以进一步应用中心频率为 f_{sig} 的带通滤波器滤波。在信号连续注入的情况下, 可以选择递归的IIR滤波器, 而在编码注入的情况下, 应采用非递归的FIR滤波器。

由于对于在线绝缘监视、参数测量和一般的故障诊断来说, 对实时性要求不是很高, 所以一般都有足够的处理时间, 这样就可以选取阶数较高的数字滤波器和较为精确的算法, 从而获得较高的计算精度, 并降低对信号源强度的要求。

3 应用举例

上述外加诊断信号的选取和检测方法, 已在作者所设计的消弧线圈自动跟踪补偿及接地选线定位装置中得到应用, 该装置的原理示意图如图3所示。

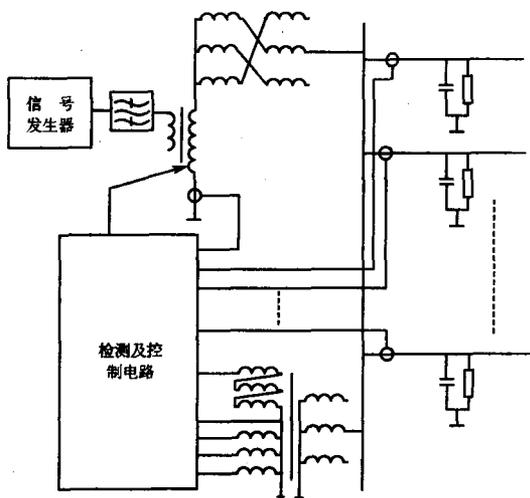


图3 装置的原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of device

整套装置由接地变压器(Z型变压器)、消弧线圈、信号注入回路、信号检测回路、消弧线圈控制

回路等几部分组成。

信号注入回路通过带通滤波器接至消弧线圈的副圈, 负责在正常运行及永久性接地故障的情况下向电网注入计算对地电容和检测接地故障的外加诊断信号。信号检测回路从电压互感器PT的二次侧获取电压信号, 从消弧线圈的接地点和各出线的零序PT处检测电流信号。检测到的信号既包含了注入的检测信号, 也包含了工频及各次谐波的干扰信号。

应用上述数字滤波方法, 可以消除工频和各次谐波等干扰信息, 得到对应于注入信号的采样值, 然后利用傅氏算法等, 可以算出信号电压、电流的幅值和相位。在系统未发生接地故障时, 进一步可以求出整个系统及各条线路的对地容抗和绝缘电阻, 从而实现消弧线圈的自动跟踪补偿和系统对地绝缘情况的在线监视。在系统出现单相接地故障后, 可以根据各出线信号电流的大小或相位, 指示出接地的线路。

由于对地电容的容抗与信号的频率成反比, 频率越大容抗越小, 所以为了提高计算的精确度和分辨率, 减小线路电感对计算的影响, 注入信号的频率不宜选取过高。在设计中, 我们选取 $N=1$, $P=20$, $Q=12$, 即注入信号基波频率介于工频基波与二次谐波之间, 工频信号每个周期的采样点数为20, 注入信号每个周期的采样点数为12, 由此推算出为采样频率为1000 Hz, 注入信号的频率为83.3 Hz。

经式(3)的差分滤波后, 基波和9次以下的谐波全部被滤除, 将 $P=20$ 、 $Q=12$ 代入式(6)中可以得到 $A(\omega_{\text{sig}} T_s) = 2 \left| \sin \frac{20 \cdot \pi}{12} \right| = \sqrt{3}$, 即式(3)对83.3 Hz的信号不仅不会削弱, 而且会放大至原信号的 $\sqrt{3}$ 倍, 如图2所示。

实验室实验和现场测试的结果均表明, 上述的信号选取和检测方法能够有效地消除工频及各次谐波引发的干扰, 能够精确地检测、计算出注入的信号。

4 结论

利用外加注入信号进行电气设备的在线故障诊断、运行监视和参数检测, 具有判断准确、灵敏度高等优点, 目前已成为电力系统中重要的技术方

(下转第28页 continued on page 28)

行点将 PV 转化为 PQ 节点, 化除了约束, 使计算速度大大加快。

参考文献

- [1] 陈浩河. 电力系统电压稳定分岔点快速算法研究 (硕士学位论文) [D]. 广州: 华南理工大学, 2000.
CHEN Hao-he. Research of Voltage Stability on Electric Power System, Thesis [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2000.
- [2] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003. 171-176.
ZHOU Shuang-xi. Voltage Stability and Controlling of Electric Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. 171-176.
- [3] 江伟, 王成山. 电力系统输电能力研究中 PV 曲线的求取 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 9-12.
JIANG Wei, WANG Cheng-shan. The Acquisition of PV Curve in the Study of Transmission Capability of Electric Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 9-12.
- [4] 朱振青, 杨晓广. 电力系统电压稳定性分析的实用算法 [J]. 电网技术, 1998, 22(4): 15-18.

- ZHU Zhen-qing, YANG Xiao-guang. The Practice Algorithm of Voltage Stability Analysis in Electric Power System [J]. Power System Technology, 1998, 22(4): 15-18.
- [5] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定性分析的改进连续潮流法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 13-16.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. Improved Continuation Power Flow of Voltage Stability Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 13-16.
- [6] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 309-310.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Electric Grid [M]. Beijing: Qinghua University Press, 1996.

收稿日期: 2006-01-18; 修回日期: 2006-12-25

作者简介:

- 戴伟华 (1969-), 男, 副教授, 研究方向为电力电子; E-mail: dwh690318@126.com
熊宁 (1975-), 男, 在读研究生, 研究方向为电力系统稳定与经济运行;
李倡洪 (1962-), 男, 讲师, 研究方向为电力电子。

(上接第 15 页 continued from page 15)

自身的工频及谐波电压、电流等均为干扰信息, 所以具有干扰信号特强、信噪比极低的特点。为了便于从强干扰环境下取出有用信息, 本文在分析的基础上, 提出了注入信号选取的原则和方法, 导出了信号检测和处理的方法。实验室模拟实验和现场测试的结果证明了本文所述方法的正确性。

参考文献

- [1] 刘立群, 韩轲. 注入式定子接地保护新方案及应用 [J]. 湖南电力, 1996, (6): 3-8.
LIU Li-qun, HAN Yun. A New Generator Stator Grounding Fault Protection Scheme Based on Signal Injection Principle [J]. Hunan Electric Power, 1996, (6): 3-8.
- [2] 毕大强, 王祥珩, 余高旺, 等. 高准确度外加 20Hz 电源定子接地保护的研制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 75-78.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, YU Gao-wang, et al. Generator Stator Grounding Fault Protection Based on Accurate 20Hz Injection Signal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 75-78.
- [3] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术 [J]. 电网技术, 1997, 21(10): 50-55.
SANG Zai-hong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al. New Method for Fault Line Detection and Fault Point Location in Non-effective Grounding Systems [J]. Power

- System Technology, 1997, 21(10): 50-55.
- [4] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29-32.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, YU Yong-yuan, et al. New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Variable Frequency Current [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32.
- [5] 李煜. 小议电力电缆在线检测的几种方法 [J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 73-78.
LI Yu. Discussion About Some Methods Used for On-line Monitoring of Electric Power Cables [J]. High Voltage Technology, 2004, 30(4): 73-78.
- [6] 李冬辉, 徐津津. 一种新的直流系统环网接地故障检测方法 [J]. 电网技术, 2006, 30(2): 57-60.
LI Dong-hui, XU Jin-jin. A New Method to Detect Grounding Fault of Looped Network in DC Power System [J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 57-60.

收稿日期: 2006-09-01

作者简介:

- 潘贞存 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统继电保护和自动控制; E-mail: zcpan@sdu.edu.cn
丛伟 (1978-), 男, 博士, 讲师, 研究领域为电力系统继电保护和自动控制;
丁磊 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。