

一起低频减载误动作事件分析及改进措施

张华杰¹, 杨紫苓², 刘明忠¹, 张纯¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000)

摘要:集成于线路保护装置的低频减载功能作为电力系统最后一道防线具有重要意义且应用广泛,但低频减载功能误动作时有发生。为提高配电网供电可靠性,文中针对一起低频减载误动作事件起因进行分析,发现铁磁谐振为误动作诱因,同时从保护装置二次回路角度出发,分析认为装置存在小PT饱和、计算误差等问题导致相间电压频率计算出现偏差,进而引起低频减载功能误动作。通过电磁仿真手段对误动作原因进行验证,其仿真结果与误动作事件实际录波吻合。最后,依据误动作原因,从改善装置电压采样、优化频率计算等方面提出了4点改进措施。

关键词:低频减载;铁磁谐振;误动作;二次回路;频率算法

中图分类号:TM 77 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)05-0075-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220514

Analysis of A Low-frequency Load Shedding Misoperation Event and Its Improvement Measures

ZHANG Huajie¹, YANG Ziling², LIU Mingzhong¹, ZHANG Chun¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract: The low-frequency load shedding function integrated in line protection device is of great significance and widely used as the last line of defense in power system, but the misoperation of low-frequency load shedding function occasionally occurs. In order to improve the power supply reliability of distribution network, the causes of a low-frequency load shedding misoperation event are analyzed, in which ferromagnetic resonance is the cause of misoperation. From the perspective of secondary circuit of protection device, it is analyzed that the small PT saturation and calculation error lead to the deviation of phase-to-phase voltage and frequency calculation, which causes the misoperation of low-frequency load shedding function. The causes of misoperation are verified by electromagnetic simulation respectively, and the results are consistent with the actual recording of misoperation event. Finally, according to the causes of misoperation, four improvement measures are put forward from improving voltage sampling and optimizing frequency calculation.

Key words: low-frequency load shedding; ferromagnetic resonance; misoperation; secondary circuit; frequency algorithm

0 引言

当电网发生严重故障导致局部电网与主网解列后,低频减载装置可靠动作^[1-2],能够维持局部电网功率平衡,低频减载是防止系统频率崩溃最后一道防线^[3]。电力系统低频减载功能可集成于配电网线路保护^[4]中或者通过集中式减载装置进行配

置^[5],前者具有接线简单、运行维护方便、投资少等优点,应用广泛。但集成于配电网线路保护装置的低频减载功能误动作时有发生^[6],目前针对低频减载功能误动作原因缺乏深入研究,为提高配电网供电可靠性,有必要开展集成于配电网线路保护装置的低频减载功能误动作原因分析。

自设计规范^[7]实施后,配电网线路保护装置的频率通过相间电压进行计算,因不接地系统固有的

中性点偏移问题而导致的系统频率计算误差大大降低,但因铁磁谐振造成的线路保护装置低频减载误动作时有发生。下面针对一起因配电网铁磁谐振导致低频减载误动作的事件开展深入分析,通过仿真进行误动作原因验证,并提出相应解决措施。

1 低频减载误动作事件诱因分析

2022 年某日,某 110 kV 常规变电站某条馈线保护装置的低频减载功能动作,动作报文显示动作频率为 48.6 Hz,装置内部提取的动作录波如图 1 所示。此时保护装置低频减载频率定值为 49 Hz,低频减载电压定值为 70 V,低频减载延时定值为 0.15 s。

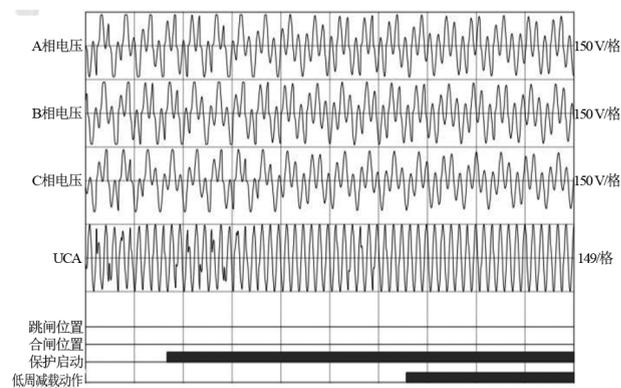


图 1 误动作事件装置录波

通过图 1 可以发现,系统相电压发生严重的畸变,含有大量的分频谐波,符合配电网铁磁谐振特性,低频减载动作时该变电站正常并网运行,没有出现脱网,变电站高压侧频率未出现异常,判定为铁磁谐振期间装置低频减载功能的误动作。

不接地系统中,当配电网系统中对地电容与传统电磁式电压互感器的额定激磁电感的比值在一定范围内,因外部激励作用(如系统发生单相瞬时接地故障)造成系统相电压升高,从而导致电压互感器铁芯饱和并使该相的激磁感抗迅速下降。此时激磁感抗和系统容抗相匹配,产生谐振过电压。当系统谐振条件未破坏时,配电网谐振可持续存在^[8]。

铁磁谐振持续过程中,系统中三相励磁电感交替变化,造成系统中性点电压持续偏移,将导致系统相电压含有较大的分频或倍频谐波,其中 1/2 分频、1/3 分频谐波是铁磁谐振的重要特征^[9]。

2 低频减载误动作分析及验证

经配电网铁磁谐振特性分析可知,铁磁谐振会导致中性点电压持续变化,系统相间电压并不会因谐振而产生变化。但该线路保护装置的内部计算合成的相间电压存在严重畸变(图 1 中第 4 通道),造成误动作的原因需针对保护装置及其二次回路特性进一步分析。

10 kV 线路保护装置二次接线回路如图 2 所示。由图可知,线路保护装置通过内部小 PT 将二次电压信号转换成 AD 芯片所能承受的小信号,并由装置内部计算合成的相间电压作为频率计算依据。

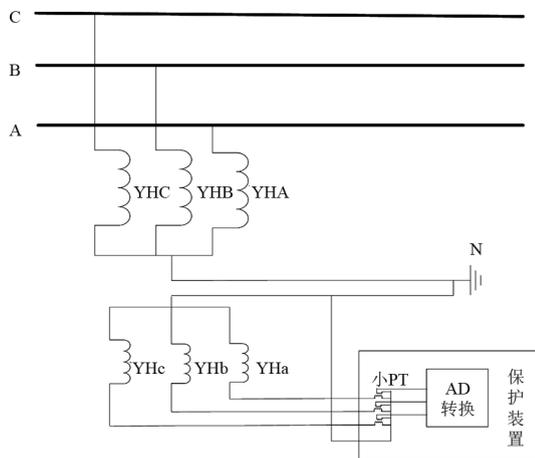


图 2 保护装置二次回路

在铁磁谐振情况下保护装置存在小 PT 饱和、采样计算误差等问题,将导致装置计算频率与实际系统相差较大,引发低频减载误动作,通过 PSCAD 软件进行电磁仿真模拟上述现象,验证装置误动作原因的正确性。

2.1 模拟小 PT 饱和

当发生铁磁谐振时,相电压幅值可达正常电压幅值的 2~3 倍,将造成装置内部小 PT 饱和。首先通过小 PT 等效电路原理分析其饱和时造成的电压采集影响,装置小 PT 等效电路如图 3 所示。

装置小 PT 的电路与双绕组变压器 T 形等效电路一致,其中: X_L 为二次电缆的等效电抗; V_1 为电压互感器二次绕组电压; V_2 为小 PT 副边绕组电压; R_m 和 X_m 分别为小 PT 的激磁电阻和激磁电抗,合在一起称为激磁阻抗 Z_m 。因小 PT 铁芯磁路的磁化曲线的非线性关系,其激磁阻抗 Z_m 不是一个常值,随着小 PT 饱和程度的增加而减小,因此小 PT 饱和时副

边电压 V_2 会发生非线性变化,导致装置采集的相电压出现畸变。

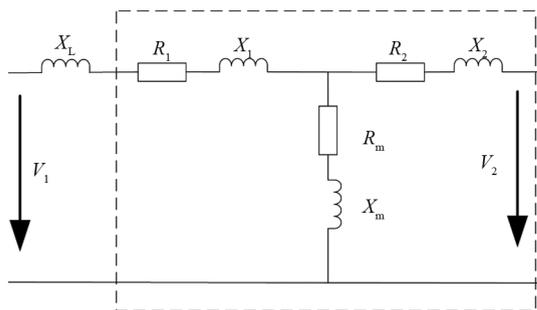


图 3 装置小 PT 等效电路

通过电磁仿真手段进行验证,模拟配电网系统发生铁磁谐振,造成小 PT 饱和,并采用常规的频率算法得到相间电压频率计算结果,仿真波形如图 4 所示。其中通道 1—5 分别为 10 kV 线路电压(A 相)、小 PT 原边电压(A 相)、小 PT 副边电压(A 相)、装置内部计算相间电压(AB)、AB 相间电压计算频率(离散傅里叶变换算法)。

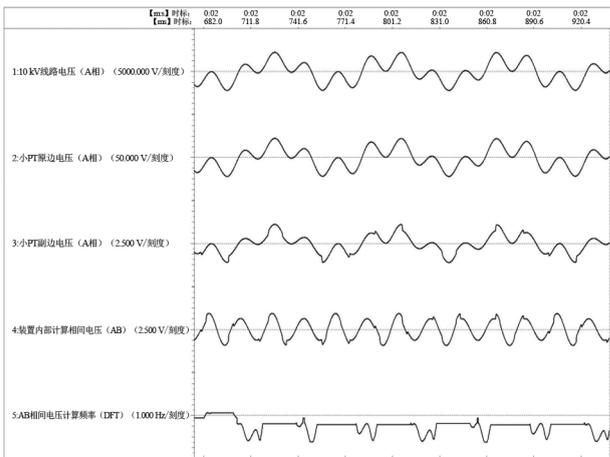


图 4 铁磁谐振导致装置小 PT 饱和和仿真波形

通过波形可以看出因小 PT 饱和导致装置内部计算相间电压(AB)出现畸变,与图 1 畸变情况相符。采用基于离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)变化插值的频率算法^[10]的频率计算结果出现波动,从图 1 可以看出,频率计算结果小于 49 Hz(小于 50 Hz 为负)持续时间超过 0.15 s,这将会导致保护装置的低频减载功能误动作。

2.2 模拟计算误差

因装置计算频率所使用的相间电压是通过所采集的各相电压进行合成的,装置固有的硬件特性将会导致所采样的各通道相电压存在延时。

通过模拟系统 A 相故障后 0.1 s 后恢复,单相故障引发配电网铁磁谐振,同时装置 A 相电压因采

样及计算存在 0.5 ms 延时,仿真结果如图 5 所示,其中通道 1—6 分别为 10 kV 线路电压(A 相)、二次电压(A 相)、装置内部采样电压(A 相)、装置内部计算相间电压(AB)、AB 相间电压计算频率(零交越法)^[11]、AB 相间电压计算频率(DFT 算法)。

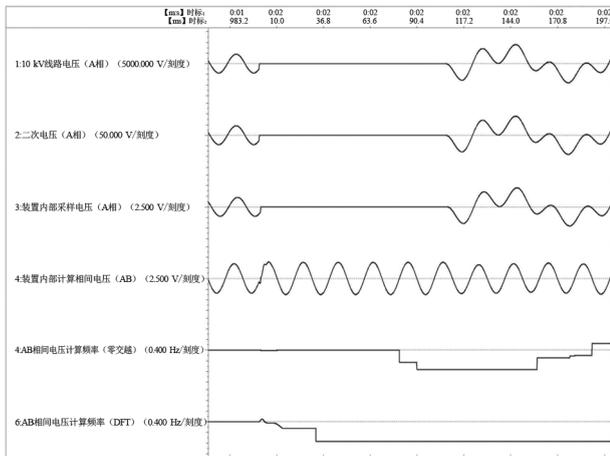


图 5 装置采样延时仿真波形

通过图 5 可以看出,系统未发生铁磁谐振时,频率计算结果将维持在 50 Hz,通道计算延时并未对正常情况下装置的合成相间电压频率计算造成影响,而谐振期间零交越法和基于 DFT 算法的频率计算结果均出现变化(以 50 Hz 为基准),可能导致保护装置的低频减载功能误动作。

3 改进措施

下面分别从装置硬件改造和软件升级角度出发,提出 4 种改进的措施。

3.1 提升装置电压通道线性采样范围

目前,相关标准还未有效规范 10(35) kV 不接地系统保护装置电压通道的线性采样范围,导致因小 PT 饱和造成配电网谐振期间装置电压采样出现非线性变化。建议不接地系统的保护装置提升电压通道线性采样范围,配置高饱和特性的小 PT,使装置所采集的相电压更真实地反应系统一次电压,避免装置低频减载功能误动作。

3.2 配置相间电压采集通道

为避免因装置小 PT 饱和、计算误差导致保护装置所合成的系统相间电压结果不正确,装置可配置相间电压采集通道,直接通过物理方式外接相间电压,可解决谐振期间相间电压计算不准的问题,有效避免装置低频减载功能误动作。

3.3 改进频率计算方法

因为常规 DFT 的频率计算方法的栅栏效应,仅能准确计算出含有倍频谐波的系统频率,无法准确计算出含有分频谐波的系统频率。因此需要在 DFT 算法的基础上加入合适的窗口函数^[12],识别因小 PT 饱和或计算误差所产生的非特征谐波,提升频率计算结果的准确度。或采用多种频率计算方法相结合的方式判别系统频率,进而避免因单一频率算法缺陷导致装置低频减载功能误动作。

3.4 升级装置逻辑

目前,依据文献[7],装置均可通过频率变化率(滑差)来闭锁装置低频减载功能。该功能可防止短时间窗内因计算频率大幅变化导致装置误动作的情况发生,但仍没办法完全防止低频减载功能误动作发生。低频减载功能可针对配电网铁磁谐振的分频谐波特性或零序电压异常等特点增加相关闭锁逻辑。

4 结 论

通过低频减载功能误动作实例,深入分析了引发保护装置在配电网铁磁谐振下误动作原因,提出了装置小 PT 饱和、计算误差会引起装置频率计算出现误差的观点,并从仿真波形上证明所提观点的正确性。根据低频减载误动作原因,提出了 4 点可改进措施建议,其中:措施 1 和措施 2 均为从装置硬件上进行升级,改善装置采集误差问题;措施 3 和措施 4 通过软件方式升级,分别提高频率计算准确度、增加铁磁谐振识别逻辑防止低频减载功能误动作。

参考文献

[1] 唐倩,沈旭,李圆智,等.电网低频减载技术及标准研究[J].电工技术,2021(23):46-48.

(上接第 74 页)

[14] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 108-120. DOI:10.1186/s41601-016-0024-y.

[15] YANG Ting, ZHAO Rui, ZHANG Weixin, et al. On the modeling and analysis of communication traffic in intelligent electric power substations [J]. IEEE

[2] 高剑,朱童,罗异,等.考虑配网负荷曲线特性的低频减载执行方案调整方法[J].电力系统保护与控制,2021, 49(24):159-167.

[3] 袁季修.试论防止电力系统大面积停电的紧急控制——电力系统安全稳定运行的第三道防线[J].电网技术,1999,23(4):3-6.

[4] 杨博,解大,陈陈,等.电力系统低频减载的现状和应用[J].华东电力,2002,30(9):14-18.

[5] 王怀远,何培灿,温步瀛.基于响应信息的分散式低频减载方案[J].电网技术,2019,43(8):2976-2982.

[6] 王彩丽,王俊辉,白海松,等.10 kV 线路低频减载误动作问题分析及改进[J].电工电气,2017(10):48-50.

[7] 国家电网公司科技部.10 kV~110 kV 线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1766—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.

[8] 何龙,马金财,杜龙基,等.小电流接地系统铁磁谐振过电压关键影响因素辨识[J].电气工程学报,2020, 15(2):61-69.

[9] 曾祥君,杨先贵,王文,等.基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J].中国电机工程学报,2015, 35(7):1666-1673.

[10] HART D, NOVOSEL D, HU Yi, et al. A new frequency tracking and phasor estimation algorithm for generator protection.[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1064-1073.

[11] EHRMAN Leonard. Analysis of a zero-crossing frequency discriminator with random inputs[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics, 1965, 12(2): 113-119.

[12] VISHWAKARMA Amit Kr, SUKUMAR N, SUMATHI P. Two-dimensional DFT with sliding and hopping windows for edge map generation of road images[J]. IET Image Processing, 2022, 16(4):972-984.

作者简介:

张华杰(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制工作;

杨紫苓(1988),女,硕士,高级工程师,从事电力调度运行、自动化、通信、保护等工作。

(收稿日期:2022-07-19)

Transactions on Power Delivery, 2016, 32(3): 1329-1338.

作者简介:

汪勤(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护;

吴旻(1986),男,工程师,研究方向为继电保护;

姚辉昌(1978),男,高级工程师,研究方向为继电保护;

李江洋(1997),男,研究方向为继电保护。

(收稿日期:2022-08-23)