

输电线路谐波过电压保护实现方法

丁宣文,朱鑫,周文越

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘要:在弱联系电网中,一台普通主变压器空载合闸后,随着其引发的励磁涌流注入到电网中,极有可能在系统末端产生较大的谐波畸变导致系统末端出现严重的谐波过电压,造成设备与负荷的损毁,带来严重的经济损失。为解决现有输电线路过电压保护无法反应谐波过电压的问题,提出了输电线路谐波过电压保护实现方法。该方法可正确反应输电线路中的基波过电压和谐波过电压,有效隔离谐波过电压在电网中的传播,保护设备免受谐波过电压的伤害。并通过试验验证了所提方法的有效性。

关键词:继电保护;谐波过电压;过电压保护;励磁涌流;输电线路

中图分类号:TM 86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)03-0066-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230311

Implementation Method of Harmonic Overvoltage Protection for Transmission Line

DING Xuanwen, ZHU Xin, ZHOU Wenyue

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:In weak-link power grids, after a normal main transformer closing without load, the inrush current is injected into power grid. It is very likely to cause large harmonic distortion at the end of the system, thus lead to serious harmonic overvoltage, which can cause damage to electrical equipment and load and bring serious economic losses. In order to solve the problem of over-voltage protection which is unable to respond to harmonic overvoltage for the existing transmission lines, the method of harmonic overvoltage protection for transmission lines is put forward. The proposed method can correctly respond to fundamental overvoltage and harmonic overvoltage of transmission line, effectively isolate the propagation of harmonic overvoltage in power grid and protect equipment from harmonic overvoltage damage. The effectiveness of the proposed method is verified by experiments.

Key words:relay protection; harmonic overvoltage; overvoltage protection; inrush current; transmission line

0 引言

对于采用串供式长线路等弱联系方式与主网相连的弱电网,其联络线上潮流较轻,联络线的运行方式近似于一条空载长线路。在此类电网中,若对电网中某台主变压器进行空载合闸操作,随着主变压器励磁涌流^[1-6]注入电网的谐波,极有可能在系统末端产生较大的谐波畸变,从而导致系统末端出现谐波过电压,引发设备与负荷的损毁,带来严重的经济损失。在四川省的藏区电网,就发生过多起因线路谐波过电压造成电力

设备或负荷受损的事件。随着川藏联网工程和藏中联网工程等弱联系电网的建成,此类问题将更加突出。

当线路出现过电压时,利用保护装置的及时动作可有效隔离过电压线路,因此给线路装设过电压保护^[7-9]可有效解决此问题。目前,现有过电压保护装置均是基于基波电压有效值实现其保护原理,仅能反应线路中的基波过电压,无法反应谐波过电压。当线路中谐波电压含量较大时,如何使保护装置正确反应线路中的谐波过电压、保护电网设备免受谐波过电压的侵害是继电保护技术人员亟待解决的问题。

1 谐波过电压产生机理

变压器在进行空载合闸操作时,在满足某些合闸条件时将产生很大的励磁涌流,其数值可达变压器额定电流的6~8倍。励磁涌流内含有大量的2次、3次、4次等谐波,当电网为弱电网且线路较长时,励磁涌流所激发的谐波电流会在电网沿线进行传播并被逐渐放大,最终将在线路的末端引发很大的谐波过电压^[10-11]。

这种过电压主要是由电压电流在输电线路中传输时的驻波效应产生的。对于空载线路末端,在考虑分布参数的影响下,其首末两端电压电流的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{\sin \beta l}{\cos \theta} \\ \dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_1 \sin \beta l}{Z_c \cos \theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_1 、 \dot{I}_1 为始端电压、电流; \dot{U}_2 为末端电压; β 为线路的传播常数,由线路的单位阻抗和导纳决定; Z_c 为特征阻抗,同样由线路的单位阻抗和导纳决定; l 为线路长度; θ 为 β 与 l 的乘积。

定义末端电压和始端电压的比值为过电压倍数。以3次谐波和5次谐波为例,其过电压倍数与线路长度的关系如图1所示。从图1可以看出,当线路长度接近1/4波长(对于3次谐波和5次谐波而言,1/4波长分别约为500 km和300 km)时,线路末端的电压降趋于无穷大。藏区电网的弱联系电网中存在大量的此类长距离线路,导致线路末端的谐波电压极易被放大到较高的值。

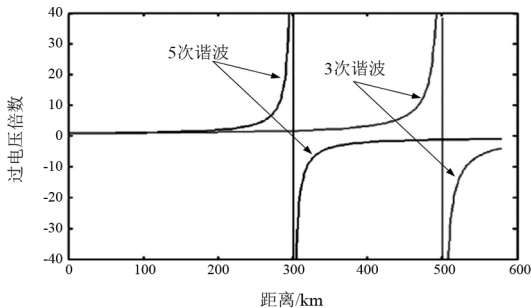


图1 谐波分布特性

2 现有过电压保护分析

对于现有的输电线路过电压保护装置,其过电

压保护的电压判据仅判断线路电压的基波有效值。即保护装置利用傅里叶算法,计算某个固定周期内(≤ 20 ms)的基波电压有效值,若此有效值大于过电压定值,则满足判据。

某110 kV藏区电网实际出现过的谐波过电压波形如图2所示。从图2可以看出:线路电压波形出现了严重的畸变,线路电压中含有大量的谐波分量,其中3次谐波含量尤为高;A相线路电压的峰值已达到167 kV(即1.85倍的额定电压),而A相线路电压的基波有效值基本保持恒定在线路的额定电压为63 kV。在此情况,即使线路配置有过电压保护,但由于基波电压有效值正常,过电压保护也不会动作。

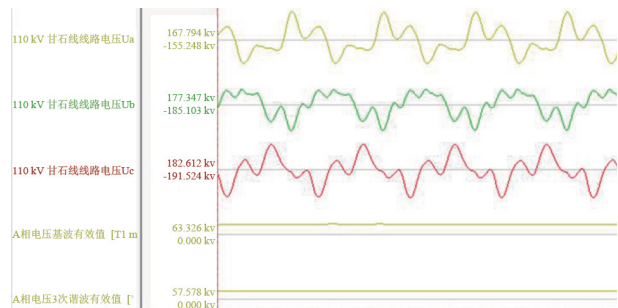


图2 谐波过电压实际波形

3 谐波过电压保护实现方法

由上面的分析可知,在弱联系电网中,极大可能发生因励磁涌流导致线路末端出现谐波过电压的事件,而现有的过电压保护无法反应此类谐波过电压。因此,有必要在现有的过电压保护基础上,研究谐波过电压保护实现方法。

3.1 谐波过电压判据

现有的过电压判据是基于基波有效值实现的,此判据将自动忽略掉线路中的谐波电压,无法正确反应线路中的谐波过电压。因此引入谐波过电压判据来正确度量线路中谐波电压的大小。

从发生过的谐波过电压损坏电气设备的事件来看,谐波过电压对电气设备的伤害主要体现在高电压对电气设备绝缘的影响。若参考基波过电压判据,以谐波的有效值作为保护动作判据,但此有效值虽可正确度量谐波的大小,并不能代表全电压的大小。而导致设备绝缘受损的电压值并不只是电压中的谐波含量,而是全电压的大小。综上,定义谐波过电压判据如下:

1) 将全电压波形的瞬时值作为谐波过电压判据;

2) 考虑到判据的灵敏性,以工频周期 20 ms 作为一个判据计算周期,在保护动作延期内,每个计算周期均有至少一个电压采样点的绝对值大于瞬时值定值,则满足判据;

3) 为简化保护定值的整定,将基波过电压定值的 $\sqrt{2}$ 倍作为瞬时值定值。

3.2 保护装置硬件要求

现有的过电压保护装置,其 A/D 采样频率通常为 1200 Hz,即每个工频周期采 24 个点。在利用傅里叶算法^[12-15]计算基波有效值的情况下,此采样频率完全够用。但对于所提出的瞬时电压判据,由于需采集电压的瞬时值,在单个测量周期内,受采样率限制,可能存在测量结果躲过峰值附近的小区间而产生较大的误差(如图 3 所示),从而使得装置漏判该周期内的过压情况,引起保护拒动。

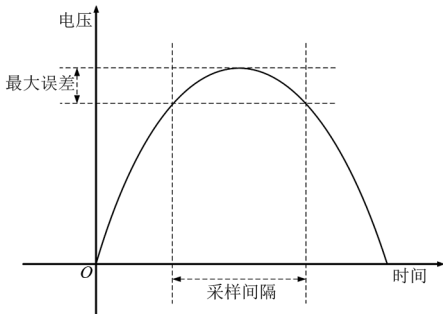


图 3 采样误差

采样过程中单个采样点电压值越限即视为过电压。如图 3 中,当相邻两测点以峰值时刻为 midpoint 时,实测值为峰值时刻偏移半个采样周期对应值,此时一个 n 次谐波周期内测得的谐波电压峰值的误差 $\delta\%$ 最大,满足式(2)。

$$\delta\% = \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} - n \times \frac{2\pi}{k} \times \frac{1}{2} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

式中: n 为谐波次数; k 为每个工频周期内采样点数。从式中可看出,谐波次数越大、采样率越低,误差越大。

励磁涌流的谐波以 2~7 次为主。以最大的 7 次谐波为例,误差与每个工频周期内采样点数的关系如图 4 所示。在 1200 Hz 的采样频率下,即每个工频周期采样点数为 24 时,误差约为 39%,可看出,若按目前保护装置的采样率,则误差将非常大。基于上述原因,为实现谐波过电压保护,需提升保护装置的采样频率。为降低保护装置的升级成本,提升后

的频率需为 1200 Hz 的整数倍,对于 7 次谐波,不同采样率的误差如表 1 所示。

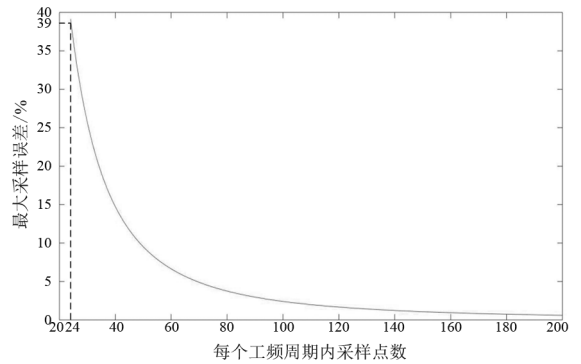


图 4 7 次谐波下采样误差与每个工频周期内采样点数的关系

表 1 7 次谐波采样误差

采样率/Hz	工频周期采样点数	最大采样误差/%
1200	24	39.12
2400	48	10.31
3600	72	4.63
4800	96	2.61
6000	120	1.68

DL/T 478—2013《继电保护和安全自动装置通用技术条件》规定:110 kV 及以上电压等级保护装置电压采样相对误差不大于 2.5%。考虑到 6000 Hz 的采样率制造难度太大,且需要升级保护底层平台。因此,将保护装置的采样频率定为 4800 Hz,其工频周期采样点数为 96,7 次谐波的最大采样误差为 2.61%。

另一方面,由于保护装置的采样频率提升了,A/D 前端的硬件滤波环节也应该进行相应的改变。考虑到励磁涌流的谐波以 2~7 次为主,则保护装置的硬件滤波环节应按照电压通道可保留 99% 的 7 次谐波设计。

3.3 保护动作逻辑

谐波过电压保护除具备反应谐波过电压能力的同时,还应具备常规过电压保护的功能。因此,设计谐波过电压保护的逻辑如图 5 所示。

对于图 5 所示的保护动作逻辑,需注意以下几点:

1) 在动作逻辑中,“ $U_A/U_B/U_C >$ 过电压定值”这个动作判据包含基波过电压和谐波过电压两个判据。由于两个判据使用同一个定值,在逻辑图中用同一个方框表示。但基波过电压判据使用的是过电压定值本身的值,而谐波过电压判据使用的定值则是保护程序在过电压定值自身数值的基础上乘以 $\sqrt{2}$ 。

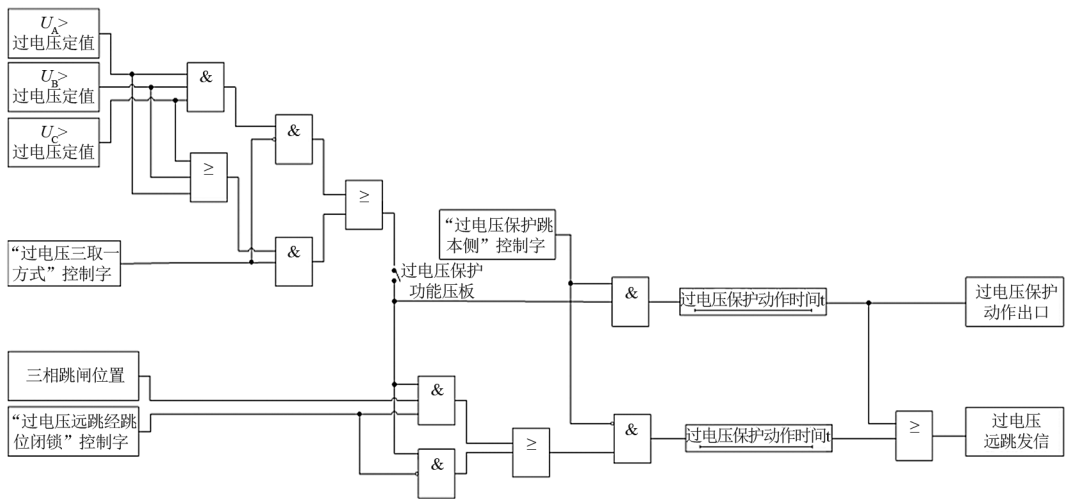


图5 谐波过电压保护动作逻辑

2) 基波过电压与谐波过电压采用或逻辑,任一过压元件动作时,过电压保护动作。

3) “过电压保护”功能压板退出时,过电压保护不出口跳闸,不远跳对侧。

4) “过电压保护跳本侧”控制字为1:当过电压元件满足时,“过电压保护动作时间”开始计时,延时满足后,过压保护出口跳本侧,同时不经跳位闭锁直接向对侧发过电压远跳信号。

5) “过电压保护跳本侧”控制字为0:当“过电压元件”和“三相跳闸位置”均满足要求时,“过电压保护动作时间”开始计时,延时满足后,过压保护不跳本侧仅向对侧发过电压远跳信号。但是,是否经本侧跳位闭锁发信由“过电压远跳经跳位闭锁”控制字整定。

4 谐波过电压保护试验

根据所提方法开发出了谐波过电压保护装置。为验证所提方法的有效性,对该装置进行谐波过电压保护专项试验。

4.1 理想电压波形下的保护试验

利用继电保护测试仪给谐波过电压保护装置加入基波电压与不同谐波电压叠加后的电压波形,测试保护装置的动作情况。

1) 动作时间测试:过电压跳闸方式整定为三取一,过电压保护定值 U_{zd} 整定为 75 V(二次值),过电压保护动作延时整定为 0.5 s,三相均加入额定电压值的基波电压,在 A、B、C 三相分别叠加 2 次、3 次、5 次、7 次谐波电压,测试保护的过电压保护动作时间。其中,所叠加谐波的有效值为 $1.1U_{zd} \sim U_n$ (U_n 为额定电压)。

保护动作时间如表 2 所示。

表2 保护动作时间测试结果

叠加谐波次数	A相动作时间/s	A相误差/%	B相动作时间/s	B相误差/%	C相动作时间/s	C相误差/%
2	0.534 8	6.96	0.532 8	6.56	0.533 6	6.72
3	0.534 3	6.86	0.533 3	6.66	0.533 4	6.68
5	0.534 1	6.82	0.533 0	6.60	0.533 1	6.62
7	0.534 7	6.94	0.532 9	6.58	0.532 8	6.56

2) 动作值精度测试:过电压跳闸方式整定为三取一,过电压保护定值 U_{zd} 整定为 75 V(二次值),过电压保护动作延时整定为 0.5 s,三相均加入额定电压值的基波电压,将 A、B、C 三相分别叠加的 2 次、3 次、5 次、7 次谐波电压设为变化量,按谐波与基波实现峰值叠加原则控制谐波与基波间的相位差。谐波电压从 0.9 倍整定值往上升至保护动作,步长不大于 1‰ 整定值,单步变化时间不小于整定延时 +100 ms,其初始谐波电压有效值为 $0.9U_{zd} - U_n$ 。测试保护动作时的动作电压值与理论动作电压值差异,测试结果如表 3 所示。理论动作电压应为保护整定值的 $\sqrt{2}$ 倍,即 106.05 V。

表3 保护动作值精度测试结果

叠加谐波次数	A相动作电压/V	A相误差/%	B相动作电压/V	B相误差/%	C相动作电压/V	C相误差/%
2	105.57	0.45	105.81	0.23	105.75	0.28
3	105.56	0.46	105.78	0.25	105.74	0.29
5	105.53	0.49	105.77	0.26	105.74	0.29
7	105.50	0.52	105.80	0.24	105.74	0.29

从理想电压波形下的保护试验可看出,谐波过电压保护能正确反应谐波过电压。在保护动作时间的测试中,谐波过电压保护的过电压保护动作时间偏差在 7% 以内;在保护动作值精度测试中,谐波过电压保护的

动作值精度在 0.6% 以内。两项测试结果均较好。

4.2 实际电压波形下的保护试验

利用继电保护测试仪的波形回放功能,导入实际的谐波过电压波形文件,设置相关波形回放参数后,启动测试仪进行波形回放,检验保护装置在特定谐波过电压水平下动作行为的正确性。谐波定值和时限设定与理想电压波形下的试验一致。所导入的两个实际电压试验波形如图 6 和图 7 所示。

试验结果如表 4 所示。从试验结果中可以看出,将两个实际电压波形加入到保护装置中,保护均正确动作,再次验证了所提方法的有效性。

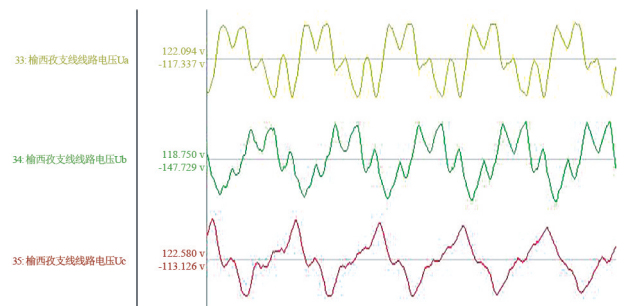


图 6 试验波形 1

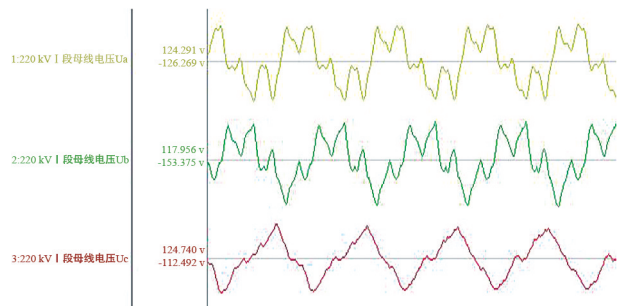


图 7 试验波形 2

表 4 实际电压波形测试结果

试验电压波形	动作时间/s
波形 1	0.535 8
波形 2	0.534 9

5 结 论

上面针对现有过电压保护无法反应谐波过电压的问题,从保护判据、保护装置硬件要求、保护动作逻辑三方面入手,提出了谐波过电压保护实现方法。通过理想电压波形和实际电压波形下的试验,验证了所提方法的有效性。所提出的谐波过电压保护可有效解决弱联系电网中的谐波过电压问题,依据所提方法研制的谐波过电压保护装置已成功应用于川藏联网、藏中联网工程中的若干条长线路中,作为控制谐波过电压的主要手段之一。

参考文献

- [1] 傅伟,赵莉华,梁勇,等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.
- [2] 凌光,苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.
- [3] 范兴明,葛琳,张鑫,等. 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 54-59.
- [4] 王业,陆于平,蔡超,等. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 702-711.
- [5] 王雪,王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
- [6] 李振强,谷定燮,戴敏. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-392.
- [7] 焦在滨,金吉良,行武,等. 交直流混联电网自适应交流过电压保护方案的研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2541-2547.
- [8] 张哲任,徐政,薛英林. MMC-HVDC 系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
- [9] 杨凤民,罗旻,郑琰. 架空绝缘线路过电压保护技术的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 68-70.
- [10] 滕予非,丁理杰,汤凡,等. 基于谐波互阻抗的励磁涌流引发谐波电压畸变风险识别[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 155-161.
- [11] 魏巍,向天堂,丁理杰,等. 励磁涌流引发的谐波过电压机理分析以及抑制措施研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(24): 24-32.
- [12] 李斌,李永丽,贺家李. 一种提取基波分量的高精度快速滤波算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 39-43.
- [13] 刘益青,高伟聪,孙天德. 适用于数字化保护的改进递推傅里叶算法[J]. 电网技术, 2006, 40(5): 1601-1606.
- [14] 薛春旭. 电力系统微机继电保护交流采样算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [15] 韩正庆,高仕斌,李群湛. 基于半波傅里叶算法的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 60-63.

作者简介:

丁宣文(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

朱鑫(1988),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护。
(收稿日期:2022-08-30)