

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802005

基于无功补偿设备的谐振过电压检测和抑制控制方法研究*

陈炜炜 詹跃东

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘要:为降低谐振引起的铁磁谐振过电压对电气设备的绝缘的损害程度,本文提出了一种基于配电网无功补偿设备的具有无功补偿和消谐功能一体化的新型配网装置及控制方法,通过 MATLAB/Simulink 仿真,验证该新型控制方法可以抑制谐振过电压,并通过搭建简易的配电网模拟线路和无功补偿设备,进一步分析得到在原本的无功补偿设备的基础上增加零序控制通路,即可向配电网注入一定频率和幅值的共模电压或共模电流,从而实现谐振过电压抑制功能。

关键词: 配电系统;谐振;无功补偿;零序控制通路;抑制功能

中图分类号: TN751 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on resonance overvoltage detection and suppression control method based on reactive power compensation equipment

Chen Weiwei Zhan Yuedong

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to reduce the damage of the ferromagnetic resonance overvoltage caused by resonance to the insulation of electrical equipment, this paper proposes a new type of distribution network device and control based on the reactive power compensation device and the reactive power compensation and harmonic elimination function integration. The method, through MATLAB/Simulink simulation software, verifies that the new control method can suppress the resonant overvoltage, and further analyzes and draws the conclusion based on the original reactive power compensation equipment by constructing a simple distribution network analog line and reactive power compensation equipment. By adding a zero-sequence control path, a common mode voltage or a common mode current of a certain frequency and amplitude can be injected into the distribution network, thereby realizing the resonance overvoltage suppression function.

Keywords: distribution system; resonance; reactive power compensation; zero sequence control path; suppression function

0 引言

目前对谐振过电压的抑制主要是从改变参数、制定合理的操作程序以及增大网络阻尼等方面提出措施。其中可行的消谐措施主要有选用励磁特性较好的电磁式电压互感器或采用电容式电压互感器、在电压互感器(potential transformer, PT)开口三角绕组接阻尼电阻、电压互感器高压侧中性点经非线性电阻消谐器接地等。选用励磁特性好的 PT 能使谐振条件不容易满足,但是却不能在谐振发生时及时抑制。在 PT 开口三角绕组接阻尼电阻的方法中电

阻值越小,抑制效果越好,谐振状态持续时间越短,但是电阻值小会对其自身的热容量以及成本要求比较高^[1]。电压互感器高压侧中性点经非线性电阻消谐器接地的方法虽然得到广泛应用,但是这样的消谐方式始终存在可能会带来零序电压指示的异常偏高而导致运行人员的误判和保护装置的误动作问题。

针对单相接地故障中常用的消谐措施存在的对消谐电阻要求不容易达到以及可能出现的零序电压指示异常偏高而导致误判和误动作问题^[2],本文旨在提供一种通过无功补偿装置即可实现快速消除电网谐振过电压的方法。一般

收稿日期:2018-08-20

* 基金项目:国家自然科学基金(51667012)项目资助

配电网通常需要配备无功补偿、消谐等一系列装置,造成配电网系统保护设备繁杂,管理不便,保护和检测设备利用率低等问题。针对此问题,本文提出一种基于配电网无功补偿设备的具有无功补偿和消谐功能一体化的新型配网装置及控制方法。

1 总体方案

三相电源(变压器二次侧)采用中性点不接地形式,为了模拟真实的线路参数,在三相线路上连接有:三相电压互感器、三相线路对地电容以及模拟线路单相接地的接地电阻。无功补偿设备安装在三相母线侧,在 10 kV 的配电网系统中,其拓扑可能是多电平结构,也可能是级联 H 桥等多种形式。配电网拓扑和发明装置结构如图 1 所示,本方案实验原理如图 2 所示。图 1 中的无功补偿设备的直流侧中性点需要通过接触器 S1 进行接地,图 2 中的无功补偿设备直流侧中性点的引出方式为分裂电容方式,然后通过接触器将直流侧中性点进行接地。为了获得更小的输出电流纹波,本文采用 LCL 作为输出滤波器。

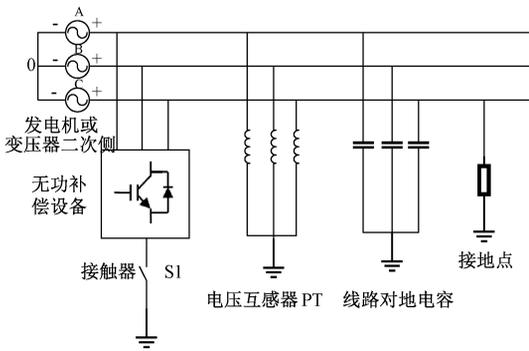


图 1 配电网拓扑和发明装置结构

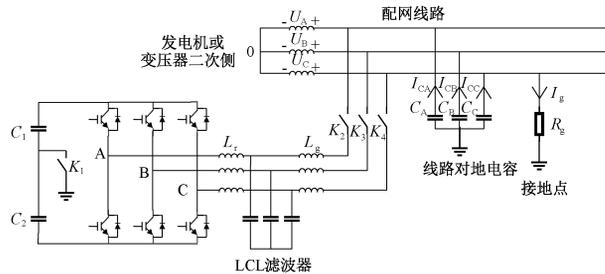


图 2 本方案实验原理

2 方案实现原理分析

脉宽调制技术(pulse width modulation, PWM)基本原理:控制方式就是对逆变电路开关器件的通断进行控制,使输出端得到一系列幅值相等的脉冲,用这些脉冲来代替正弦波或所需要的波形,双极性 PWM 调制原理如图 3 所示。也就是在输出波形的半个周期中产生多个脉冲,使各脉冲

的等值电压为正弦波形,所获得的输出平滑且低次谐波少。按一定的规则对各脉冲的宽度进行调制,即可改变逆变电路输出电压的大小,也可改变输出频率^[3-6]。

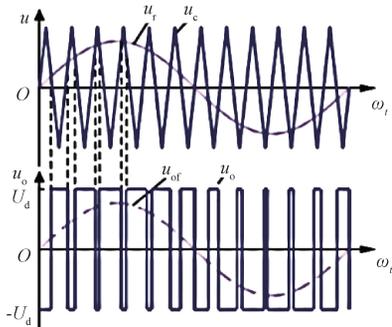


图 3 双极性 PWM 调制原理

根据 PWM 调制的基本原理,忽略输出电压的高频纹波,如图 4 所示为无功补偿设备等效电压源,可以将图 2 按如图 4 所示进行简化,即将电力电子设备等效成共模和差模电压源。其中 U_0 表示共模电压, U_{dA} 、 U_{dB} 和 U_{dC} 表示差模电压。通过合适的控制策略和 PWM 调制技术,可以改变 U_0 、 U_{dA} 、 U_{dB} 和 U_{dC} 的值,从而实现无功补偿和谐振过电压抑制功能。

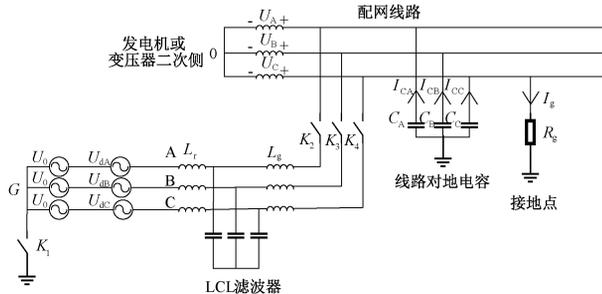


图 4 无功补偿设备等效电压源

配电网谐振过电压一般是由于线路单相接地故障消失导致的。因为当线路单相接地时,正常相线路电容电压从相电压抬升到线电压,当单相接地故障消失时,线路对地电容所存储的能量无处释放,只能通过电压互感器回路进行释放,但是电压互感器表现为感抗很大的电感,进而会产生 LC 谐振振荡,由于 LC 回路阻抗较小,所以一般的 LC 振荡时间持续较长,会造成长时间的谐振过电压现象。

图 5 所示为谐振过电压抑制等效原理,为了尽快消除谐振过电压,将图 4 中的接触器 S1 闭合,然后通过零序控制通路的闭环控制可以实现将图 5 中的共模电流 I_{com} 控制为 0,共模电流控制为 0,即可实现谐振过电压的抑制和消除。本方法的优点在于采用有源设备的主动闭环控制可以实现谐振过电压的快速抑制。

判定配电网发生铁磁谐振故障的特征在于,中心处理器实时监测配电网中性点对地电压,当中性点电压大于

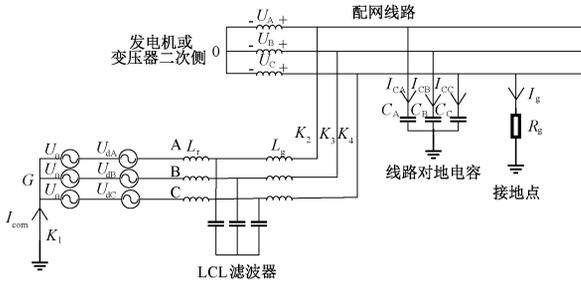


图5 谐振过电压抑制等效

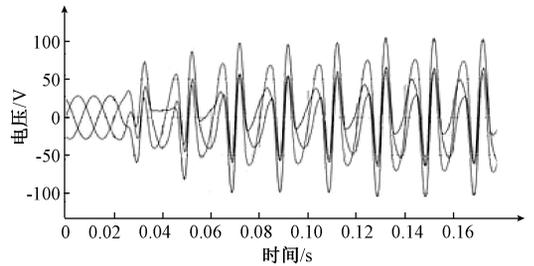


图7 三相PT电压波形

10%相电压时,对中性点电压进行频谱分析。如果中性点电压信号中分频(高频)含量超过50%时,判断配电网发生低频(高频)铁磁谐振。当中性点电压信号频谱分析不满足分频(高频)铁磁谐振判据时,变流器向配电网注入三相同频同相位电流信号^[7],中心处理器根据变流器反馈的输出电压和输出的电流信息,分析计算配电网测量导纳。当电导与配电网正常运行时电导相当,且电纳小于配网正常运行时电纳的一半时,判定配电网发生工频铁磁谐振。

3 谐振过电压抑制建模与仿真

与无功补偿模式的控制器相比,为了谐振过电压抑制功能也是需在dq控制器基础上增加零序控制通路即可,但是与测量对地电容时增加的开环零序控制不同,谐振过电压抑制功能需要增加闭环零序控制^[8-10],增加的闭环零序控制的控制器如图6所示,其中 $I_{0ref}=0$ 。

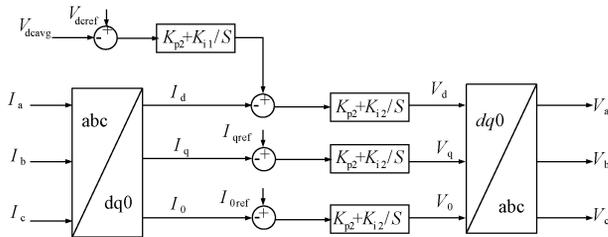


图6 谐振过电压抑制模式控制器

如图6所示为谐振过电压抑制模式控制器仿真模型图,谐振过电压抑制MATLAB仿真模型仿真参数如下:三相电源相电压,有效电压20V;单相对地电容, 50×10^{-6} F;单相PT,变压器36V侧。铁磁谐振时,三相PT电压波形如图7所示。

由图7可知,因受谐振过电压的影响,三相PT电压升高,且振荡频率较快,三相电压呈不平衡状态。过电压逐渐升高,会对设备绝缘造成不同程度的破坏。

为了确定谐振类型,需要对A相PT相电压铁磁谐振时波形FFT分析,如表1所示。

通过表1波形FFT分析可知,对比Fundamental frequency和Max frequency的数值大小,可以得出上述谐振属于高频谐振的结论。

表1 波形FFT分析

参数	数据
Fundamental frequency	50
Max frequency	300
THD computation	Nyquist frequency
Base value	1.0
Number of cycles	4

发生铁磁谐振时,电源中性点对地电压波形如图8所示。

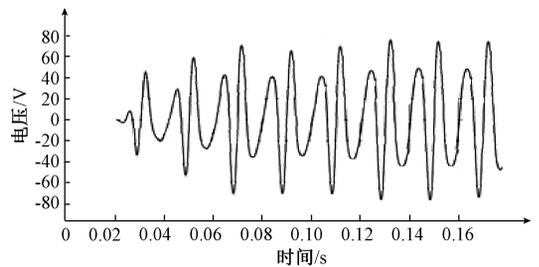


图8 谐振时电源中性点对地电压波形

由图8可知,发生铁磁谐振时,中性点对地电压急剧上升,且保持较高的电压。

在谐振过程中,突然将电力电子设备中性点接地,并开启消谐控制环路,三相电源中性点对地电压波形如图9所示。

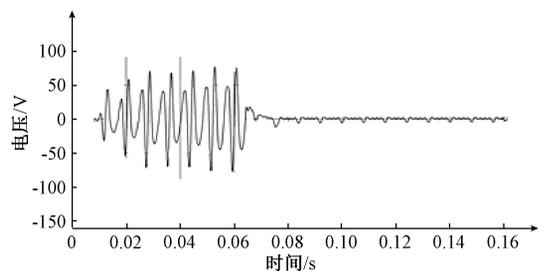


图9 谐振过电压抑制模式中中性点对地电压波形

从图9中波形来看,通过电力电子设备加入消谐控制环路可以更加快速得消除铁磁谐振。

4 分析验证

为了验证以上关于对地电容测量和消弧的分析与仿真,本文搭建了简易的配电网模拟线路和无功补偿设备^[11-13]。首先,交流侧是由三相市电电压接隔离变压器和自耦调压器得到,因为本文只进行原理性验证,所以交流侧电压经过调压器输出为线电压 50 Vrms,为了能够得到较为明显的单相接地电流,每相线路对地电容设计为 300 μF ,无功补偿设备采用三桥臂两电平拓扑,直流侧中性点采用分裂电容的方式引出,总的直流侧电压参考值为 200 V,直流侧上下两个电容的容值分别为 1.73 mF,无功补偿设备交流侧采用 LCL 滤波器,滤波器参数为单相网侧电感值为 200 μH ,单相变换器侧电感值为 400 μH ,单相电容值为 10 μF ,LCL 采用无源阻尼的方式,单相电容支路串联阻尼电阻值为 1 Ω ,为了减小共模电流的纹波,共模回路增加的共模电感值为 2 mH。控制器采用 TI 公司的 DSP28335 芯片,控制频率为 10 kHz,IGBT 的开关频率也为 10 kHz。

上位机控制界面的编写采用 LabVIEW 软件^[14-16],可以实时通过电脑向硬件控制器发出相应指令,实现测电容和消弧等一系列功能。具体的上位机控制界面如图 11 所示。LabVIEW 上位机界面包括:

1)CAN 通信控制界面:可以控制 CAN 通信的启停,改变 CAN 信息的不同格式类型,选择合适的 CAN 通信频率;

2)设备控制指令界面:向 DSP 控制器发送 DC 电压指令、无功电流指令、开环共模电压指令、闭环消弧电流指令、系统控制启动指令、开始消弧指令、开始计算对地电容值指令等;

3)设备状态反馈界面:显示 DC 电压值、对地电容值等,并实时显示系统产生的过压错误、过流错误、硬件故障等;

4)系统接触器控制界面:LabVIEW 界面上的线路拓扑图上面标记了每一个接触器的控制按钮,可以随时控制每一个接触器的开断,并且可以显示每一个接触器的开关状态;

5)关键参数波形显示界面:控制界面上的 4 个波形显示窗口,可以显示电源中性点对地电压等关键参数的相关波形。

在上述硬件和软件的实验平台上进行了谐振过电压抑制的实验。测量条件为:交流侧电源线电压为 50 Vrms,无功补偿设备的直流侧电压为 200 V。示波器的 4 个通道所测量的量分别如下所示:

CH1:A 相线路电容对地电压

CH2:B 相线路电容对地电压

CH3:C 相线路电容对地电压

CH4:三相电源中性点对地电压

图 11 所示为 C 相线路单相接地时各参量波形,当 C

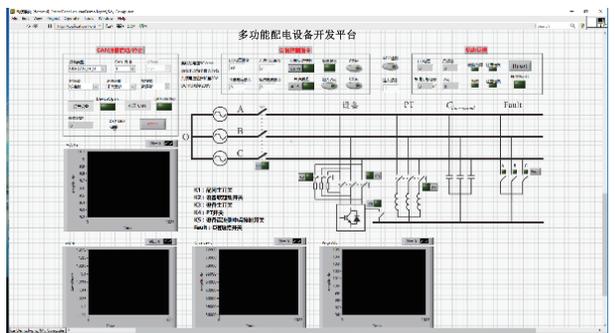


图 10 多功能配电网电力电子设备 LabVIEW 上位机控制界面

相线路单相接地时,C 相线路电容对地电压变为 0,其余两相电容对地电压为升高为线电压。三相电源中性点对地电压变为 C 相电源电压的负值。因为当线路单相接地时,正常相线路电容电压从相电压抬升到线电压,当单相接地故障消失时,线路对地电容所存储的能量无处释放,只能通过电压互感器回路进行释放,但是电压互感器表现为感抗很大的电感,进而会产生 LC 谐振振荡,由于 LC 回路阻抗较小,所以一般的 LC 振荡时间持续较长,会造成长时间的谐振过电压现象。由于本实验台架采用的 PT 是空载变压器代替的,所用的空载变压器阻抗不大,所以线路对地电容所存储的能量会很快释放,无法验证本方法的有效性。因此本方案将 PT 去掉,那么电容所存储的能量会无处释放,一直存在,更容易验证本方法的有效性。从图 12 前半部分可

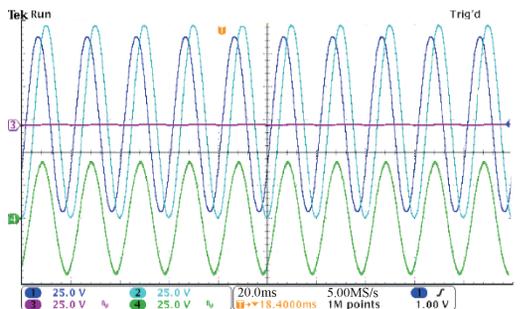


图 11 C 相线路单相接地时各参量波形

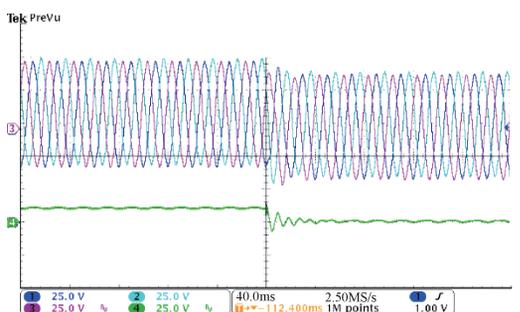


图 12 C 相线路单相接地故障消失设备中性点接地各参量波形

可以看出, C相线路单相接地故障消失后, 电源中性点对地电压依然存在, 过电压也依然存在, 当设备中性点接地时, 电源中性点对地电压会消失, 但是经过了一定的振荡过程。为了消除此振荡过程, 加入本文提出的共模电流控制方法, 如图13所示, 振荡过程明显消失, 过电压状态也得以快速消失。

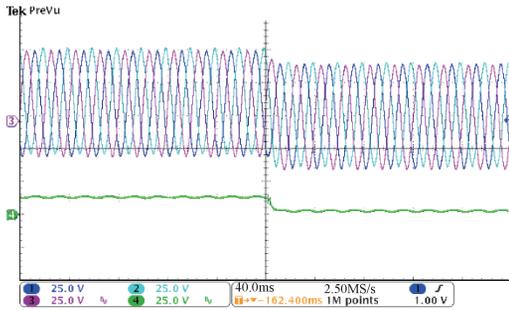


图13 C相线路单相接地故障消失设备中性点接地并开启消谐控制各参量波形

5 结 论

在配电网可靠性越来越重要的背景下, 本文提出一种基于无功补偿设备共模控制的电力电子谐振过电压消除方法。本方法只需要在原本的无功补偿设备的基础上增加零序控制通路, 即可向配电网注入一定频率和幅值的共模电压或共模电流, 从而实现谐振过电压抑制功能。并且将多种功能集成到同一台设备中, 也可以提高设备的利用率, 简化线路设备。本文通过原理分析、仿真验证和实验验证证明了本方法具有良好的谐振过电压快速消除效果。

参考文献

- [1] 王鹏, 郭洁, 齐兴顺, 等. 35 kV 中性点经消弧线圈接地系统几种铁磁谐振消谐措施有效性分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(6):34-37.
- [2] 董维. 中压配电网铁磁谐振及抑制措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.

- [3] 崔兴. 基于 DLP 激光投影电视智能环境控制系统的开发[J]. 电子技术与软件工程, 2015(22):142-142.
- [4] 童汉维. 半导体制冷器温度控制系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [5] 吴生特, 于群, 钟全亮. 磁力搅拌法在变压器油气分离中的应用[J]. 科技信息, 2014(3):4-4.
- [6] 程文龙, 徐瑾, 孙智勇. 基于 STM32 呼吸灯的实现[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(7):198-199, 213.
- [7] 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.
- [8] 何颖. 自动调谐消弧线圈投入引起谐振过电压的原因[J]. 高电压技术, 2007, 33(9):216-217.
- [9] 贺要锋, 商建华, 封晓东, 等. 关于小电流接地系统中谐振过电压的分析与探讨[J]. 继电器, 2006(23):66-69.
- [10] 高伟, 陈连贵, 赵军良. 配电网电磁式电压互感器谐振过电压抑制方法综述[J]. 陕西电力, 2008(10):32-35.
- [11] 何明. 中性点非直接接地系统中电磁式 PT 引起的谐振过电压[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2004(1):31-33.
- [12] 黄友聪, 周凯, 牟秋谷, 等. 高频谐波导致谐振过电压的分析与抑制[J]. 电力电子技术, 2013, 47(2):95-97.
- [13] 李顺福. 电压互感器铁芯饱和谐振过电压的分析及预防措施[J]. 青海电力, 2003(4):20-24.
- [14] 王红晨. 基于 LabVIEW 的“LRC 串联电路谐振特性的研究”仿真实验教学系统的设计与实现[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2009, 22(1):97-99.
- [15] 齐超, 张磊, 张渤哈, 等. 基于 LabVIEW 的暂态电路虚拟实验分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(7):39-44.
- [16] 林火养. 基于 LabVIEW 的变频器共模电磁干扰定性测量[J]. 电子测试, 2013(21):60-64.

作者简介

陈炜炜, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术、高电压技术。

E-mail: cww9339@163.com

詹跃东, 1963 年出生, 教授, 主要研究方向为电力电子技术、分布式电源接入技术研究等。