

基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈的研究

曲铁龙, 董一脉, 谭伟璞, 杨以涵

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 随着城市配电网容量的日益增大, 非线性负荷及电缆线路的大量增加, 在接地故障电流日益提高的同时, 其中的谐波及有功分量也随之大幅提高。而传统的消弧线圈无法对接地故障电流中的谐波及有功分量实现补偿, 导致接地点残流难以控制在规定范围内, 这严重威胁电网的安全运行。为此, 提出一种基于单相有源滤波技术的新型消弧线圈, 通过有源注入的方式实现对接地电流的全补偿。详细介绍了它的工作原理和预随调相结合的调谐方式, 并设计了基于H-Infinity控制理论的注入电流控制方法。计算机仿真及10 kV高压物理模拟实验验证了其有效性。

关键词: 消弧线圈; 有源滤波; 主从式; H-Infinity控制

Research on new type arc-suppression coil based on single-phase active power filter technology

QU Yi-long, DONG Yi-mai, TAN Wei-pu, YANG Yi-han

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: As the increasing capacity of MV power system, more non-linear loads and more buried cables using, the earth-fault current increases much more than before. The result is that the percent of harmonic and active current also grows much more, and can not be neglected. Since classical arc-suppression coil can not compensate the harmonic and active component. Its earth-fault current in power networks become much harder to keep the fault spot current under normal level, and has greatly threatened the security and reliability of the power networks. To solve this problem, this paper presents a new type of principal-auxiliary arc-suppression coil based on single-phase active power filter (APF) technology. By injecting the active current, it realizes the full component of the earth-fault current. In this paper, the work principles of the new device, and a combinational compensation mode of presetting and following-setting mode are analyzed in detail. In addition, a continuous time injecting current controller based on H-Infinity control theory is also designed. The results of the simulation with computer and 10kV physical simulating experiments verify the reliability and validity of the new principal-auxiliary arc-suppression coil.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Beijing(No.3062018).

Key words: arc-suppression coil; active power filter; principal-auxiliary; H-Infinity control

中图分类号: TM711; TM727

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)03-0029-05

0 引言

自1916年德国彼得生发明消弧线圈以来, 经过80多年的现场实践验证, 在谐振接地系统中, 消弧线圈能够有效地自动消除配电网中大部分的弧光接地故障, 可以大大提高城市配电网运行的安全性和可靠性, 因此在世界范围内得到了广泛的应用^[1]。在中国, 随着自动调谐式消弧线圈在上世纪90年代的研制成功, 消弧线圈已经更为广泛地应用于10~66 kV的中压配电网中。

但是随着城市配电网容量的日益扩大, 非线性负荷的大量增加以及电缆线路的大量使用, 在接地故障

电流不断提高的同时, 其中的谐波及有功分量也随之大幅提高^[2-4], 文献[3]通过分析两次现场的实际事故波形, 指出过大的电网电容电流, 以及接地电流中的有功分量和高次谐波是导致电网单相接地故障加重的主要原因; 文献[4]通过对一个中压配电网的实际运行监测, 指出当电缆线路发生单相接地故障时, 接地电流中的高次谐波含量不可忽视, 并将影响继电保护装置的正常运行, 直接威胁电网的正常运行。而现有的消弧线圈是一种无源补偿接地故障电流的装置, 它按照电网工频对地电容来进行调谐, 即用自动跟踪补偿的方法来限制接地电流的无功分量以实现理想调谐。对于接地残流中的有功和谐波分量则无法实现有效补偿, 这是传统消弧线圈在原理上存在的一个不

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3062018)

足。

1 新型主从式消弧线圈设计

目前,国内外的消弧线圈,包括一些新型的基于晶闸管控制的自动调谐消弧线圈^[5-7]:晶闸管自动投切电阻式、高漏抗变压器式以及晶闸管投切电容式。通过使用晶闸管可以达到微秒级的响应速度。但总的来说,从原理上还是通过不同的调节方式,尽可能地补偿工频下的电网接地电容电流,使残流限制在一个允许的范围内。

然而,在实际应用中,即便是消弧线圈工作在理想调谐下,接地电流中仍然存在三部分无法补偿的残流^[1-4]:由于消弧线圈未精确调谐而存在的电流无功分量;由于消弧线圈和电网本身存在的有功损耗而存在的电流有功分量;由于系统中非线性元件而产生的电流谐波分量。尤其随着配电网接地电流的不断增大,这部分未补偿部分的含量有时甚至达到整个接地电流的10%,这将严重威胁配电网的安全可靠运行。

1.1 新型主从式消弧线圈的构成

为此,本文提出一种基于单相有源滤波技术的新主从式消弧线圈,实现对接地故障电流有源全补偿。如图1所示。它以自动调匝式消弧线圈为主体,用于补偿大部分的接地故障电流,并且可以明显降低从消弧线圈的容量,这有利于使从消弧线圈具有快速的响应特性;并联采用单相电压式有源滤波器形式的从消弧线圈,利用PWM控制直流电压生成补偿电流。具有响应速度快,补偿范围广,无谐波污染的优点。其主要目的是对主消弧线圈补偿过的接地残流实现精确补偿。为保障补偿精度,从消弧线圈的补偿范围将覆盖主消弧线圈的所有档位。

1.2 从消弧线圈的基本工作原理

如图1所示,其中的从消弧线圈由于采用PWM控制的单相电压式逆变器,可以看作是等效的可控电压源 U_{LA} ,图中的 Z_c 主要包括输出滤波阻抗和输出电抗 L_A 构成,其中输出滤波阻抗主要是虑除输出电压中的高次谐波分量。其基本的工作原理就是^[12-14]:当电网发生单相接地故障时,对应电网中性点会出现一个中性点电压 U_0 ,这个电压 U_0 同可控电压 U_{LA} 共同作用于输出电抗 L_A 上时,就会有:

$$L \frac{di_{LA}}{dt} = (U_{LA}(t) - U_0(t)) \quad (1)$$

通过控制与 U_0 不同相位、幅值的 U_{LA} ,即可实现生成任意需要的从消弧线圈输出电流 i_{LA} 。这样就可以通过有源注入的方式,不仅实现对接地故障

电流中无功及谐波分量的动态补偿,还可抵消故障发生时的有功损耗,即实现对接地电流中的有功分量进行有源补偿。

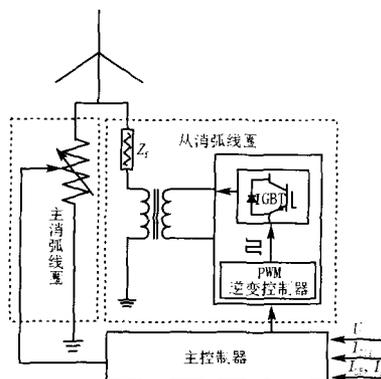


图1 新型的主从式消弧线圈

Fig.1 New type of principal-auxiliary arc-suppression coil

2 新型主从式消弧线圈自动调谐的实现

为了更好地发挥消弧线圈的作用,既有效减小接地残流,又限制中性点位移电压在许可的范围内。目前国内外通用的是两种处理方式^[5-7],预调试补偿方案和随调式补偿方案。它们各自有其应用的特点,但都存在一定的不足。预调试的补偿精度受限于消弧线圈的调节精度,故障接地残流大小与阻尼电阻的退出速度有直接关系;而随调式方案在精度上解决了自动调匝式消弧线圈精度不高的问题,并可避免谐振过电压的出现,但无法抑制故障瞬间接地点残流过大的问题。

为此,在本文运用预调和随调相结合的补偿方式。在这种方式下,消弧线圈在正常运行时置于15%过补偿点附近,故障时快速预测跟踪接地电流变化,限制接地电流在许可范围内。这种补偿方式的优点在于:发挥调匝式主消弧线圈补偿时立即补偿的优点,基本可瞬时熄灭电网中60%~80%电弧;迅速调整从消弧线圈注入电流,自动跟踪补偿接地电流变化,尽量降低接地点残流,降足以熄灭系统中发生的绝大多数电弧。在故障选线上,我们在原有有功功率法、5次谐波分量法以及小波方法基础上,结合新型的有源式从消弧线圈,采用电流突变量方法,在自动跟踪补偿接地电流的过程中,故障线路的零序电流产生的突变最大这个原理来进行可靠选线^[8]。

为实现新型消弧线圈的自动调谐,电容电流的自动跟踪测量以及从消弧线圈补偿电流的控制将是关键所在。

2.1 在线电容电流跟踪测量

在系统正常运行下, 如何调整消弧线圈在 15% 过补偿点附近, 其核心就在于精确的电容电流测量。目前国内外通常采用在线监测电容电流的方法, 包括位移电压法, 调档、调隙、调磁法, 相位法等。测量的原理基本都是利用谐振接地电网在正常运行时的串联谐振电路性质来实现的。根据新型主从式消弧线圈无阻尼电阻的特点, 对电容电流的在线检测采用改进 E_0 方法^[9]。

如图 2 所示, 主从式消弧线圈在实际运行中, 是一个 LC 串联回路。由于主从式消弧线圈在电网正常运行时运行在 15% 过补偿度左右, 这要比系统阻尼率大得多, 从而可以忽略系统阻尼的影响。图中 E_0 为系统的不平衡电压, 该变量是中性点不接地运行时得到的中性点电压或母线 PT 开口三角电压。依据图 2, 我们可以得到系统过补偿时候的向量关系图 3。

则有:

$$E_0 = U_0 + U_C \quad (2)$$

其中: E_0 、 U_0 、 U_C 、 I_0 分别为向量 E_0 、 U_0 、 U_C 、 I_0 的模值。则可以建立标量形式的跟踪方程: $U_C = U_0 + E_0$ 即: $I_0 / \omega C = U_0 + E_0$

最终得到:

$$I_C = U_\phi / X_C = \omega C U_\phi = U_\phi I_0 / (U_0 + E_0) \quad (3)$$

根据式(3)就可以实时跟踪系统接地电容电流的变化, 本文称之为改进 E_0 法。在实用中, 每隔一定时间 (如 3 s) 测量一次 U_0 、 I_0 两个电气量, 依据式(3)来实时跟踪系统电容电流的变化。这种方法在测量过程中不需进行调档操作, 减少了有载开关操作次数; 测量周期短, 只要系统对地电容发生变化, 在不大于 3 s 时间内, 装置可测量出系统的对地电容, 并根据测量值调节主消弧线圈分接头, 从而实现系统接地电容电流实时跟踪的目的。由于主从式消弧线圈在电网正常运行时运行在 15% 过补偿点附近, 因此, 此时中性点的位移电压一般较大, 可以满足电容电流的测量精度要求。

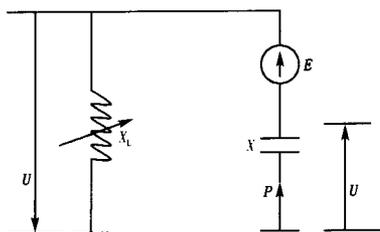


图 2 主从式消弧线圈零序等值电路

Fig.2 Equivalent zero sequence circuit of the resonant grounded system (without damping resistor)

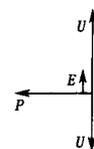


图 3 改进 E_0 法等效相量关系图

Fig.3 Phase relationship of the equivalent serial circuit in the resonant grounded system

2.2 消弧系统建模及 H-Infinity 控制设计

现代 H-Infinity 控制理论已广泛应用于电力系统、机器人和 FACTS 等领域的应用研究^[12]。当电网发生接地故障时, 为了实现从消弧线圈对接地电流的有效有源补偿, 本文基于 H-Infinity 控制理论实现了从消弧线圈的快速补偿电流生产方法, 并推导出满足实际应用效果的控制器。

图 4 为图 1 的简化模型^[1], 当系统发生 B 相单相接地故障时。电路图中的参数定义如下: 接地点电流 I_e , 零序电容电流 I_{C0} , 流经主消弧线圈的电流 I_{LP} , 从消弧线圈输出电流 I_{LA} ; 发生故障时接地点等效的叠加电压 U_b , 中性点电压 U_0 , 从消弧线圈的输出电压 U_{LA} ; 接地阻抗 R_e , 三相的等效零序电容 $3C_0$, 从消弧线圈的输出阻抗 Z_f 。

我们的控制目标是 minimized 接地点电流 I_e , 则

$$I_e = I_{LA} - (I_{C0} - I_{LP}) \quad (4)$$

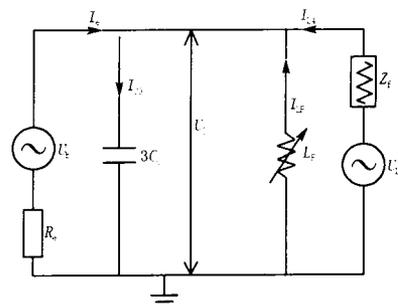


图 4 当电网发生 B 相接地故障时的简化电路图

Fig.4 Simplified electrical circuit representation for the system during phase-B single-phase earth-fault

由于主消弧线圈仅能补偿接地电流中的无功分量, 剩余部分都需要从消弧线圈生成 I_{LA} , 进行有源补偿, 包括谐波分量。我们可以推导出下面的传递函数模型^[10]:

$$I_e(s) = \underbrace{\frac{N_1(s)}{D(s)}}_{G(s)} (U_{LA}(s) - U_b(s)) + \underbrace{\frac{N_2(s)}{D(s)}}_{d(s)} (I_{C0}(s) - I_{LP}(s))$$

(5)

这里有:

$$N_1(s) = -1, N_2(s) = Z_f(s), D(s) = R_c + Z_f(s)$$

依据基于 H-Infinity 的现代控制理论, 我们可以将上述模型转换为标准的 H-infinity 控制模型。即控制输入 u , 外部干扰输入 v , 可控输出 z 以及可测输出 y 。如图 5 所示:

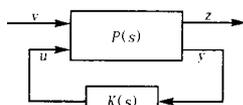


图 5 标准的 H-infinity 控制模型

Fig.5 Standard control scheme

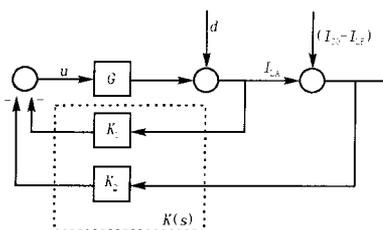


图 6 基于 H-infinity 标准模型推导的闭环控制图

Fig.6 Closed loop structure

依据公式 (5), $G(s)$ 描述的是控制输入 $u = U_{LA} - U_b$ 以及接地电流 I_e 之间的传递函数, $d(s)$ 则是附加的输出干扰项, I_{C0}, I_{LP} 则是可测输出项, 而可控的输出是 I_{LA} 。为实现最小接地电流的目的, 最终我们得到如图 6 所示的闭环控制图, 并可推导出闭环传递函数为

$$\begin{pmatrix} I_{LA} - (I_{C0} - I_{LP}) \\ I_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+G(K_1+K_2)} & \frac{1+GK_1}{1+G(K_1+K_2)} \\ \frac{1}{1+G(K_1+K_2)} & \frac{1+GK_2}{1+G(K_1+K_2)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} d \\ (I_{C0} - I_{LP}) \end{pmatrix} \quad (6)$$

这里我们定义

$$T = \frac{1+GK_1}{1+G(K_1+K_2)} = \frac{I_e - (I_{C0} - I_{LP})}{I_e}, \text{ 控制器 } K(s)$$

是由 K_1 和 K_2 两个控制函数构成。

依据 H-Infinity 控制理论, 为了保证控制的有效性, 我们引入 $\sup_{\omega} |T(j\omega)| \ll \epsilon$ 作为控制器 $K(s)$ 的设计

原则, 其中 ϵ 是一个尽可能无穷小的正实数。这样, 利用基于 Matlab 鲁棒控制工具箱的标准程序, 可以获得一个 17 阶的控制器 $K(s)$, 并取得了非常理想的仿真结果。但在实际动模实验中, 为保证系统的动态

响应速度, 利用基于 Gram 矩阵的平衡算法对获得的控制器进行降阶处理, 最终得到一个 7 阶的控制器, 同样可以满足控制精度要求。

3 计算机仿真与高压实验

基于 Simlink/Matlab 平台的仿真实验及 10 kV 高压物理模拟实验验证了新型主从式消弧线圈的可行性, 及控制方式的有效性。

图 7 是基于 Simlink/Matlab 平台的仿真结果。其中的 u_0 、 i_e 、 i_{LP} 、 i_{LA} 分别为中性点电压、接地点残流、流经主消弧线圈的电流和从消弧线圈的输出电流。可以看出在接地故障发生后的 2 个周波内, 接地点的故障电流被迅速补偿。其中接地点的故障电流经 FFT 分析后, 其 THD (谐波畸变率) 达到 181.55%, 以 5 次和 7 次谐波为主。除此外还含有 5.7% 的直流分量。

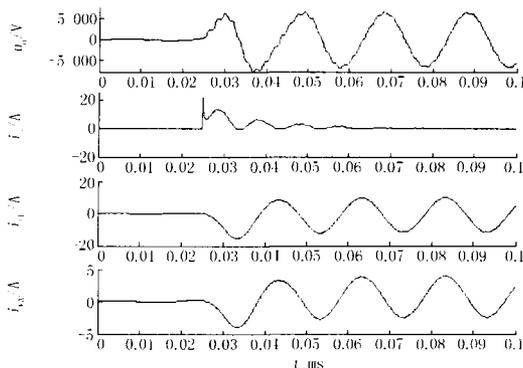


图 7 单相 300 欧姆接地计算机仿真波形

Fig.7 Waveform of computer simulation when 330 欧姆 single phase grounded

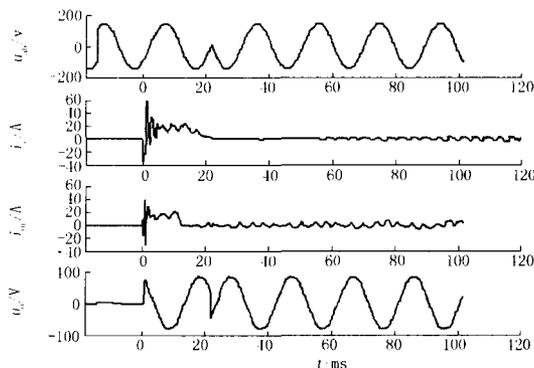


图 8 单相金属性接地 10 kV 物理模拟实验波形

Fig. 8 Waveform of 10 kV physical simulating experiment

图 8 是一次 10 kV 金属性接地试验的示波图, 图中分别给出了系统线电压 u_{ab} 、接地残流 i_e 、故障线路零序电流 i_{0f} 以及零序电压 u_0 的波形图。从图 9

可以看出, 在接地故障发生后, 系统零序电压没有发生振荡而很快进入稳态, 而接地残流和故障线路零序电流在经过 1 个周期的高频振荡后也进入稳态阶段, 主从式消弧线圈在故障发生后的一个周波后即对接地点的接地残流进行了有效补偿。这充分证实了主从式消弧线圈以及与之相适应的预随调补偿方式可以迅速补偿接地故障电流, 从而非常有利于接地电弧的熄灭。

4 结论

传统的消弧线圈无法对接地故障电流中日益增大的谐波及有功分量实现补偿, 导致接地点残流难以控制在规定范围内, 这严重威胁电网的安全运行。

1) 在分析现有无源消弧线圈的原理不足的基础上, 本文提出一种基于单相有源滤波技术的新型主从式消弧线圈, 通过有源注入的方式实现对接地电流的全补偿。

2) 文中详细介绍了它的工作原理和预随调相结合的调谐方式, 其中主消弧线圈采用技术非常成熟的自动调匝式消弧线圈, 结合改进 E_0 法, 可实现基于在线监测电网电容电流变化的预调节功能; 从消弧线圈有基于有源滤波技术的单相电压型逆变器构成, 并设计了基于 H-Infinity 控制理论的注入补偿电流控制方法, 实现对接地电流中的有功及谐波分量有效补偿。

3) 计算机仿真及 10 kV 高压物理模拟实验验证了其有效性。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
YAO huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance to Ground in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] Distribution Fault Current Analysis[R]. EPRI Report EL-3085, 1983.
- [3] 候妙兴. 接地电流中有功分量和高次谐波对电网的影响[J]. 高电压技术, 1999, 25(4):61-63.
HOU Miao-xing. The Effect of Active Component and High Order Harmonics of Neutral Current on Distribution Network Operation[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4):61-63.
- [4] Benato R, Caldron R, Paolucci A. Resonance Phenomena on Line-to-ground Fault Current Harmonics in MV Networks[A]. In: Eighth International Conference on Harmonics and Quality of Power System[C]. 1998.356- 364.
- [5] 蔡旭, 刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15):53-56.
CAI Xu, LIU Jie. Dynamic Resonance Adjustment Device of Arc-suppression Coil with Magnetic Bias[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15):53-56.
- [6] XU Yu-qin, CHEN Zhi-ye. The Method for Automatic Compensation and Detection of Earth Faults in Distribution Network[A]. In: PowerCon[C]. 2002. 1753-1757.
- [7] LIAN Hong-bo, TAN Wei-pu, LI Wen-feng, et al. Research on a New Compensation Mode in MV Power Network[A]. In: PSCE[C]. 2004. 1234-1238.
- [8] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (14):1-5.
QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of Technology of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Neutral Point Non-effectively Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14):1-5.
- [9] 连鸿波, 裴善鹏, 曲铁龙, 等. 谐振接地电网的电容电流自动跟踪测量[J]. 郑州大学学报, 2005, 26 (2):51-54.
LIAN Hong-bo, PEI Shan-peng, QU Yi-long, et al. Analysis on Measuring Error of Capacitance Current in Medium-voltage Power Network by Biased Capacitance Method[J]. Power System Technology, 2005, 29 (14):54-58.
- [10] Chevrel P, Pina F. H_{∞} Control Design Methodology for Active Filtering Problems[A]. In: IEEE International Conference on Control Applications[C]. 1997.755-760.
- [11] Machmoum M, Bruyant N, Siala S. A Practical Approach to Harmonic Current Compensation by a Single Phase Active Filter[A]. In: EPE'95[C]. Sevilla:1995.505-510.
- [12] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
MEI Sheng-wei, SHEN Tie-long, LIU Kang-zhi. Modern Robust Control Theory and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

收稿日期: 2006-07-31; 修回日期: 2006-09-13

作者简介:

曲铁龙 (1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制; E-mail: quyilong142@163.com

董一脉 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化;

谭伟璞 (1963-), 男, 副教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。