

基于 PWM 可控电抗器的自调谐消弧线圈的研究

孔宁, 尹忠东, 杨坡, 崔若晨, 蒋大鹏

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对城市配电网的快速发展所带来的单相接地故障电流过大的问题, 研究了一种基于 PWM 可控电抗器的快速自动调谐消弧线圈。对消弧线圈补偿作用的机理进行了简要分析, 并对若干种消弧线圈的自动调谐控制原理进行了对比分析, 指出电容电流间接测量法比较适合应用于这种消弧线圈的自动调谐控制。最后对某 110 kV 变电所的 10 kV 母线侧的接地故障电流的补偿情况进行了数字仿真研究, 仿真结果表明这种消弧线圈响应速度快, 具有非常好的补偿效果, 有参考应用价值。

关键词: PWM 可控电抗器; 消弧线圈; 自调谐控制

Study on automatic tuning arc suppression coil based on PWM-controlled reactor

KONG Ning, YIN Zhong-dong, YANG Po, CUI Ruo-chen, JIANG Da-peng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control of Ministry of Education (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the single-phase grounding fault over-current caused by the rapid development of the distribution network in the city, a kind of rapid automatic tuning arc suppression coil based on PWM-controlled reactor is studied. The principle of the coil's compensating effect is analyzed briefly, and several automatic tuning control principles are contrasted. The conclusion is drawn that the indirect fault current measurement method is suitable for the controlling system of the arc suppression coil. At last, digital simulation study on the compensating effect of the fault current based on the 10 kV bus of a certain 110 kV substation is done. The results show that the response speed of the coil is fast and the compensating effect is very well. The reference application significance is obvious.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50777019).

Key words: PWM-controlled reactor; arc suppression coil; automatic modulation control

中图分类号: TM475; TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0133-04

0 引言

与超/特高压输电网不同, 我国 60 kV 及以下的系统普遍采用的是中性点不接地的运行方式。在这种运行方式下如果发生单相接地故障, 只要 3~6 kV 线路故障电流不超过 30 A, 10 kV 线路不超过 20 A, 35 kV 线路不超过 10 A, 电弧可以自动熄灭, 系统就能够避免单相接地故障引起的跳闸, 可大大增加供电可靠性^[1]。但故障电流超过上述标准时, 接地电弧往往不能自熄, 并可能引发遍及全网的间歇性弧光接地过电压^[2]。这种情况下, 我国电力行业运行规程规定系统中性点要经消弧线圈接地, 以补偿单相接地故障时的电容电流。

近年来, 我国城市电网得到迅速发展, 对地电容大幅增加。同时电缆线路得到普遍应用, 单位长度电缆线路的对地电容约为架空输电线路的 20~30 倍^[1], 因此在发生单相接地故障时流过故障点的电容电流大幅增加, 明显超出规定标准, 这一现状要求电网中性点经消弧线圈接地。

传统调匝式消弧线圈虽也能起到补偿效果, 但由于不能自动跟踪电网变化实现最佳补偿, 并且为了防系统在稳态运行时出现谐振过电压, 只能处于过补偿状态, 因此故障点的残流不能减至最小。随后得到应用的调气隙式可控电抗器和带有载分接开关的自调谐消弧线圈虽然在一定程度上缓解了这一矛盾, 但由于存在响应速度慢, 故障率高, 日常维护工作量较大等缺点也逐渐被调节性能更加优越, 检测和控制更加先进, 自动化程度更高的新型消

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50777019)

弧线圈所取代。

而基于 PWM 可控电抗器的新型消弧线圈，由于采用了全控型电力电子器件，响应速度快，调谐快速准确，动态性能好，能够跟踪电网参数的变化实现最佳补偿，在克服传统消弧线圈不足的同时，还不会显著增加系统中性点的电压位移，能够大大提高中性点不接地电网的供电可靠性。

1 消弧线圈工作原理分析

图 1(a)为中性点经消弧线圈接地系统在 f 点发生单相接地故障时的等值电路图，图 1(b)为其对应相量图。设三相线路的对地电容均为 C_0 ，电源变压器的电压三相对称，且相电压为 U_p 。则单相(A 相)接地故障将使非故障相(B, C 相)的对地电压升高到 $\sqrt{3}U_p$ ，且流过故障点 f 的接地电流 I_r 由两部分组成：经 B, C 相对地电容的容性分量 I_{sc} 和经消弧线圈的感性分量 I_L 。并且：

$$I_{sc} = I_2 \cos 30^\circ + I_3 \cos 30^\circ = 3\omega C_0 U_p \quad (1)$$

$$I_L = \frac{U_p}{\omega L} \quad (2)$$

由式 (1)、(2) 知故障点 f 处的实际接地电流大小为：

$$I_r = I_{sc} - I_L = (3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})U_p$$

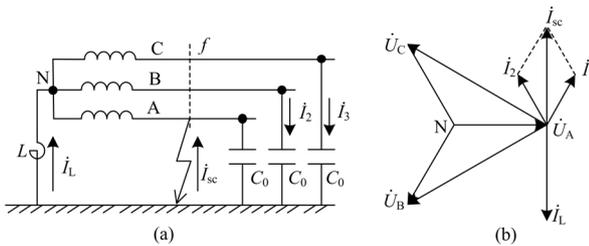


图 1 经消弧线圈接地系统等值电路图与相量图

Fig. 1 Equivalent circuit and phasor diagram of the system with arc suppression coil

若 $I_r = 0$ ，则 $I_L = I_{sc}$ ，说明消弧线圈恰好补偿了线路的对地电容的容性电流，称这种状态为全补偿；若 $I_r > 0$ ，则 $I_L < I_{sc}$ ，说明消弧线圈没有完全补偿掉电容电流，此时为欠补偿；相反，若 $I_r < 0$ ，则称为过补偿。

从理论上讲，全补偿能够最大限度地降低单相接地故障的残流，但对于传统调匝式消弧线圈却只允许工作于过补偿状态，以保证正常运行时中性点位移电压不超过系统相电压的 15%^[3]。而自调谐消弧线圈的高速调节能力就很好地解决了这一矛盾。

2 PWM 可控电抗器的调节

2.1 PWM 可控电抗器结构

图 2 所示为 PWM 可控电抗器的拓扑结构简图，它采用全控型电力电子器件 IGBT 或 GTO，是一种基于脉宽调制原理的新型可控电抗器，且具有响应速度快，谐波含量低等诸多优点。

设流过电抗器的电流为 i_L ，外加正弦电压为 u_s 。在 i_L 正半波， VT_1, VT_2 工作于互补状态， VT_3, VT_4 关闭，电压处于正半周时， i_L 积分上升，负半周时， i_L 积分下降；在 i_L 负半波， VT_3, VT_4 工作于互补状态， VT_1, VT_2 关闭，工作过程和原理与正半波时相同。通过调节开关器件的占空比即可实现入口等效输入电抗值的连续平滑调节^[4]。

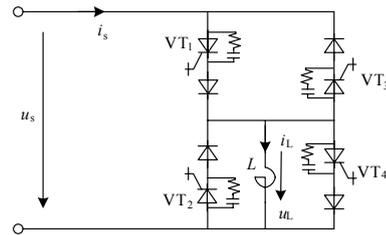


图 2 PWM 可控电抗器拓扑结构

Fig.2 Topological structure of PWM-controlled reactor

2.2 PWM 可控电抗器调节原理分析

由图 2 中 PWM 可控电抗器的拓扑结构可知，对于电抗器 L 以外的电路来说，它所实现的功能为斩控式交流调压。图 3 给出了采用三角波比较方式进行调制的原理图以及正弦斩波电压波形。为了消除正弦斩波电压波形傅里叶级数中的直流分量、余弦项以及正弦项中的偶次谐波，使 PWM 波形应具有半波对称和 1/4 周期偶对称的性质，载波比 N 可由下式确定。

$$N = f_c / f_s = 4k$$

上式中： f_c 为载波频率； f_s 为电源电压频率； k 取正整数。

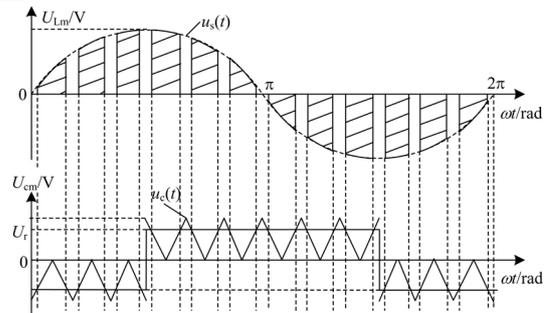


图 3 调制原理与正弦斩波电压波形

Fig.3 Principle of modulation and sinusoidal chopped wave of voltage

设直流参考电压为 U_r , 三角波载波峰值为 U_{cm} , 电源电压峰值为 U_{sm} , 开关器件导通比 (占空比) 为 α , 则有: $\alpha = U_r / U_{cm}$ 。可得电抗器 L 上的正弦斩波电压 u_L 的傅里叶级数表达式如下^[5]:

$$u_L = \alpha U_{sm} \sin \omega t - \sum_{h=1}^{\infty} \frac{U_{sm}}{h\pi} \sin(h\alpha\pi) \cdot \sin(hN \pm 1)\omega t$$

所以, 电抗器 L 上的基波电压有效值为:

$$U_{L1} = \alpha U_{sm} / \sqrt{2}$$

流过电抗器电流的基波有效值为:

$$I_{L1} = \alpha U_{sm} / \sqrt{2} \omega L$$

因此, 通过调节占空比 α , 即可连续平滑调节交流等效电抗。图 4 给出了 PWM 可控电抗器随占空比 α 从 0~1 连续变化的动态调节过程的电抗器电流 i_L 和电源电流 i_s 的波形。

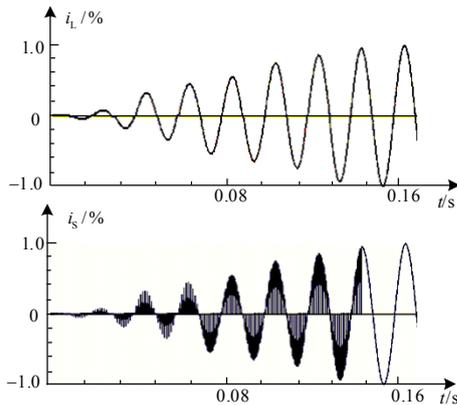


图 4 电抗器电流和电源电流波形

Fig.4 Current wave of the reactor and power source

3 消弧线圈自动调谐控制策略

中性点经消弧线圈接地系统在正常运行状态和单相接地故障状态下会呈现出各种不同的特征, 根据这些特征, 通过选择不同的测量对象和计算方法即可得到各种不同的调谐原理。目前消弧线圈的调谐原理主要有: 中性点最大位移电压法、阻抗三角形法、相位角法、电容电流间接测量法、附加电源法及信号注入法等。这些方法各具特点, 但又都存在一定的局限性, 没有达到完美的程度。中性点最大位移电压法和阻抗三角形法为预调谐法, 即在电网正常运行时进行调谐, 故障后将不再调节; 相位角法是以电网存在两相对地电容基本相同为前提条件的, 实际应用局限性较大; 附加电源法易受电网中性点自然偏移电压的影响, 必须增大附加电源电压以减弱这种影响, 但这同时又会对设备的绝缘带来威胁。最大位移电压法、相位角法和电容电流间

接测量法有一定的运行经验外, 其余方法都只是一些理论分析^[6-7]。相比之下, 电容电流间接测量法具有明显优势, 且在直流偏磁式自调谐消弧线圈中得到了成功应用。因此由 PWM 可控电抗器所具有的诸多优点可知电容电流间接测量法较适合于这种消弧线圈的自调谐控制。

由于实际电网参数并不是完全对称的, 设由三相不对称造成的系统中性点位移电压为 U_{nu} , 三相线路对地电容之和为 $C = C_A + C_B + C_C$, 则经消弧线圈接地后中性点位移电压为:

$$U_n = \frac{\omega C U_{nu}}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} \quad (3)$$

当 $\alpha = 0$ 时, PWM 可控电抗器等效电感值显然为无穷大的, 此时消弧线圈的端电压即为不装消弧线圈时中性点的位移电压 U_{nu} ; 改变占空比, 使 $\alpha \neq 0$ 且远离系统谐振点, 测得消弧线圈的端电压 U_{n2} 及其电流 I_{n2} , 若设此时的等效电感值为 L_2 , 则代入式 (3) 可解得线路对地总电容为:

$$C = \frac{\frac{1}{\omega L} U_{n2}}{\omega(U_{n2} - U_{nu})} = \frac{I_{n2}}{\omega(U_{n2} - U_{nu})} \quad (4)$$

这也就是电容电流间接测量原理, 因此, 基于这种测量原理的消弧线圈自动调谐控制策略可简单表述如下: 正常状态下, 控制系统按照一定的采样频率不断地采集不同占空比下的 U_n 和 I_n 值, 然后将数据暂存, 并根据采样数据判断是否有单相接地故障发生, 如没有故障发生, 则继续进行测量暂存。一旦检测到有单相接地故障存在, 则将最新测得的数值送到处理器根据式 (4) 求解接地电容值, 根据接地电容可得系统当前状态下的最佳补偿电抗器值及所对应的开关器件占空比, 利用此占空比调制出的脉冲信号去控制相应开关器件即可实现单相接地电容电流的最佳补偿。

4 仿真结果与分析

为了验证基于 PWM 可控电抗器的新型消弧线圈对单相接地故障电流的补偿效果, 针对某 110 kV 变电站的 10 kV 侧进行了基于 PSCAD/EMTDC 的仿真研究。10 kV 侧共有两回出线, 且均为电缆线路, 主要用于供给附近城区的居民生活用电和小部分工业负荷, 两回电缆线路的长度分别为 4.2 km 和 5.5 km。仿真系统的模型如图 5 所示。

设在 0.2 s 时, 其中一回 10 kV 电缆出线发生单相接地故障, 图 6 所示为消弧线圈退出运行时的接地故障电流 i_f 的波形, 其稳态有效值达 22.6 A, 超

过了交流电力系统规程中规定的标准。消弧线圈投入运行后，10 kV 出线再发生单相接地故障时，故障电流的容性分量和感性分量的波形如图 7 (a) 所示，而图 7 (b) 为经消弧线圈补偿以后的故障电流 i_F 的波形，其稳态有效值约为 4.2 A。可见消弧线圈对单相接地故障电流的补偿效果是非常明显的。

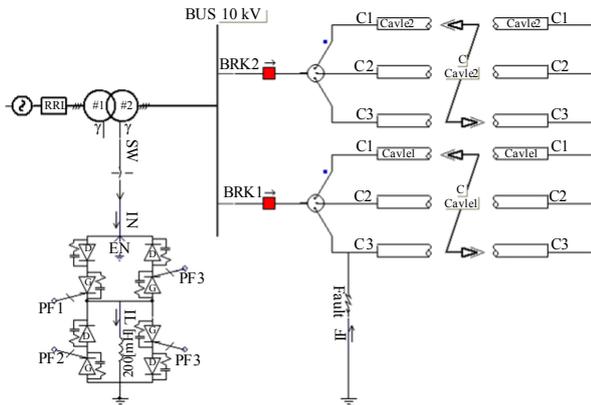


图 5 仿真系统模型

Fig.5 Simulation model of the system

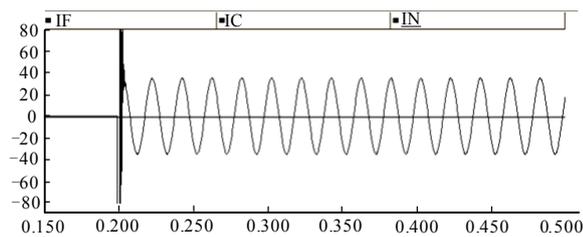
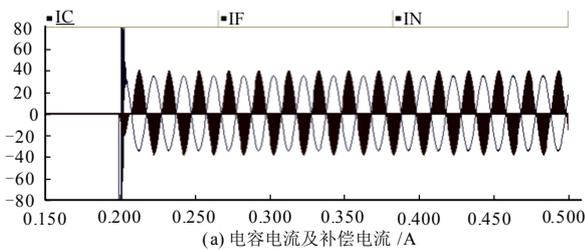
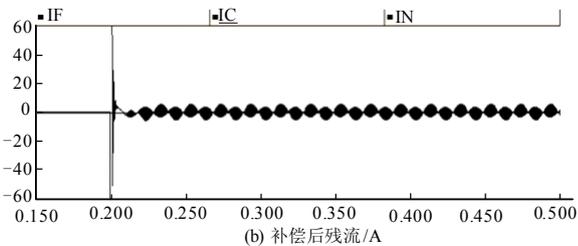


图 6 单相接地故障电流 (A)

Fig.6 Single-phase grounding fault current



(a) 电容电流及补偿电流 /A



(b) 补偿后残流 /A

图 7 安装消弧线圈后故障电流及其分量

Fig.7 Fault current and its components with arc suppression coil

5 结论

通过以上分析可以知道，由于基于 PWM 可控电抗器的自调谐消弧线圈采用了全控型电力电子器件，响应速度相当快，且动态性能好，低次谐波的含量小，基本可以忽略其影响。鉴于 PWM 可控电抗器的上述特点，指出它较适合采用电容电流间接测量法来进行全状态自调谐控制。针对某 110 kV 变电站 10 kV 侧进行的仿真实验结果表明这种新型消弧线圈能够快速补偿单相接地故障时的电容电流，使接地故障电流满足运行规程要求。

参考文献

- [1] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 1995.
CHEN Yan. Steady-state analysis of power system[M]. Second edition. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [2] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
JIE Guang-run. Overvoltage of power system[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [3] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
YAO Huan-nian, CHAO Mei-yue. Power system resonance grounding[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [4] 顾和荣, 陈秀君, 杨丽君. 新型 PWM 控制电抗器及其在无功补偿中应用[J]. 燕山大学学报, 2004, 28 (6) : 534-537.
GU He-rong, CHEN Xiu-jun, YANG Li-jun. A novel PWM-controlled reactor used for static var compensating[J]. Journal of Yanshan University, 2004, 28 (6) : 534-537.
- [5] 刘凤君. PWM 斩波器式交流稳压电源的原理分析[J]. 电源技术应用, 2002, 5 (3) : 61-65.
LIU Feng-jun. Principle analysis of a PWM chopper type AC regulated power supply[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2002, 5 (3) : 61-65.
- [6] 赵牧函, 纪延超. 消弧线圈自动调谐原理的研究[J]. 电力系统自动化学报, 2002, 14 (4) : 50-54.
ZHAO Mu-han, JI Yan-chao. Study on automatically tuning principle of arc suppression coil[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14 (4) : 50-54.
- [7] 王鸿雁, 何湘宁. 消弧线圈自动调谐原理的分析[J]. 继电器, 2002, 30 (4) : 8-11.
WANG Hong-yan, HE Xiang-ning. Analysis of automatic tuning principle about the arc-suppression coil[J]. Relay, 2002, 30 (4) : 8-11.

(下转第 140 页 continued on page 140)

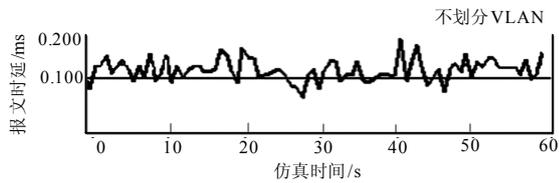


图 6 不划分 VLAN 母线保护 GOOSE 时延

Fig.6 GOOSE delay of busbar protection without dividing VLAN

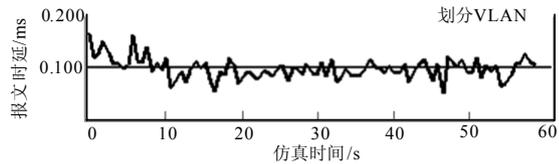


图 7 划分 VLAN 母线保护 GOOSE 时延

Fig.7 GOOSE delay of busbar protection in using VLAN

表 2 保护和控制设备 GOOSE 时延

Tab.2 GOOSE delay of protections and control devices

设备	不划分 VLAN/ms		划分 VLAN/ms	
	平均时延	最大时延	平均时延	最大时延
Protection_Busbar1	0.104 3	0.108 6	0.090 9	0.096 3
Protection_QF1	0.096 6	0.103 3	0.085 8	0.088 7
Protection_QF2	0.094 1	0.096 7	0.088 1	0.089 4
Protection_QF4	0.100 4	0.106 7	0.090 1	0.099 4
Control_QF1	0.087 6	0.102 4	0.077 9	0.082 7
Control_QF2	0.089 6	0.091 6	0.080 1	0.094 7
Control_QF4	0.093 5	0.099 2	0.088 7	0.092 4
Protection_line1	0.083 1	0.112 7	0.079 3	0.094 3

4 结论

基于 IEC61850 数字化变电站的继电保护通过通信网络来实现保护二次回路的信息交换。根据实际变电站类型和接线方式，合理设计过程层网络成为建立数字化变电站继电保护的关键问题之一。采用 VLAN 技术合理划分，数据冲突减少，有效利用

局域网带宽，可以提高报文传输的实时性能。

参考文献

- [1] 徐成斌, 孙一民. 数字化变电站过程层 GOOSE 通信方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 91-94. XU Cheng-bin, SUN Yi-min. A communication solution of process layer GOOSE in digitized substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (19): 91-94.
- [2] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 98-104. DOU Xiao-bo, HU Min-qiang, WU Zai-jun, et al. Simulation analysis on performance of communication networks in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (17): 98-104.
- [3] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29 (6): 67-71. HAN Xiao-tao, NIE Yi-xiong, YIN Xiang-gen. Research on substation secondary circuit communication system using OPNET simulator[J]. Power System Technology, 2005, 29 (6): 67-71.
- [4] Sidhu T S, YIN Yu jie. Modeling and simulation for performance evaluation of IEC 61850-based substation communication systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007.
- [5] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

收稿日期: 2009-12-09; 修回日期: 2010-03-23

作者简介:

方晓洁 (1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 数字化变电站、IEC61850 标准; E-mail: fangxj@qq.com

季夏轶 (1985-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 配电自动化;

卢志刚 (1959-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 数字化变电站。

(上接第 136 页 continued from page 136)

收稿日期: 2009-12-05; 修回日期: 2010-03-05

作者简介:

孔宁 (1984-), 男, 硕士研究生, 通信作者, 主要

研究方向为 FACTS 技术、电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: knujn0878@163.com

尹忠东 (1968-), 男, 博士后, 教授, 研究方向为 FACTS 技术、新能源发电及储能技术。