

基于电压比的并补装置电抗器匝间短路保护

林国松¹, 李梦和²

(1.西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2.广西工学院电控系, 广西 柳州 545006)

摘要: 并联电容补偿(以下简称并补)装置是电气化铁路牵引供电系统的重要设备。其串联电抗器缺乏必要的匝间故障保护;电抗器匝间故障时,电容器与电抗器电压比将发生变化;结合电气化铁路供电系统的特殊性,提出并补装置串联电抗器的基于容抗电压比的新匝间短路保护。基于 ATP 的仿真和 Matlab 的运算表明基于电容器电感器电压比的电抗器匝间短路保护,能够对匝间故障做出快速而正确的判断。该种保护已经在京秦线某变电所使用,运行一年至今,表现良好。

关键词: 电气化铁路; 并联电容补偿装置; 匝间短路; 电压比保护

Reactor on shunt capacitance compensator protection against inter-turn fault based on the voltage ratio

LIN Guo-song¹, LI Meng-he²

(1.College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031,China;

2.Guangxi University of Technology,Liuzhou 545006,China)

Abstract: Shunt capacitance compensator is an important equipment of power traction system in electrified railway. The series-wound reactor on the compensator is short of necessary protection against inter-turn fault. The voltage ratio of the capacitor and reactor will change when the fault occurs. Together with the particularity of power traction system in electrified railway, a new protection against inter-turn fault based on the voltage ratio is proposed. ATP simulation and MATLAB calculation show that the voltage ratio protection against inter-turn fault of reactor can make correct judgement to this kind of fault quickly. This kind of protection is applied at a substation in Beijing-Qinhuangdao railway and has been running well for one year.

Key words: electrified railway; shunt capacitance compensator; inter-turn fault; voltage ratio protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)11-0025-03

0 引言

我国电气化铁路牵引供电系统在变电所端口采用由电容器和电抗器串联构成的并联电容补偿装置,主要用来提高供电系统的功率因数、吸收高次谐波,同时电抗器具有抑制电容器组的合闸涌流,防止谐波对电容器造成危害,避免电容器装置的接入对电网谐波的过度放大和谐振发生。从实际运行和理论分析结果表明,既有并补装置的继电保护对于电抗器发生匝间短路甚至线圈全部短路缺乏保护,因此目前多数电抗器匝间短路是处在无保护状态下运行。电抗器匝间短路、系统谐波过电流与谐波过电压、操作过电压都可能破坏电抗器的某些绝缘薄弱部位,其中尤以操作过电压和匝间短路危害最大^[1]。有必要设置一定的电抗器匝间短路保护,本文进行理论和仿真分析,在不增加一次设备的情况下,得到一种基于并补装置上的电容器、电抗器电压比的电抗器匝间短路保护新原理。

1 既有保护不足

电气化铁路并补装置很重要的一个作用是滤除高次谐波,主要是3次谐波,并补的电抗容量和电容容量比是12%。并补设有电流速断、过电流、谐波过电流、过电压、低电压、差压、差流、不平衡电流等电量保护,设置有电抗器过热、电容器过热等非电量保护。并补装置相当于单相接线,如图1所示。

在相同母线电压和相同电容器容抗的情况下,其串接电抗器的电抗率越高,流过并补回路的电流将越大,反之亦然。当发生电抗器匝间短路时,由于电抗值的减小,并补的容抗反而增大,因而此时电流变小。所以设置作为并补过负荷和回路引线短路的过电流和速断保护,无法对电抗器保护作用。谐波过流主要是避免在较大谐波电流情况下对并补产生较大发热而设置,对于电抗器匝间短路也不能反应。过电压保护是防止在过高电压下对电容器的

击穿,低电压保护是母线失压时,防止重新带电(如变压器自投)对电容器的冲击,二者对电抗器匝间短路均无保护作用。差压(ΔU)和不平衡电流(ΔI)保护设置为检测并补电容器内部故障的电压,二者对电抗器匝间短路亦不起作用,只要电容器不发生故障,即使电抗器全部短路,其差压或不平衡电流都等于零。由于匝间短路产生的故障电流对纵差保护是穿越性的,因此纵差保护不反应电抗器匝间短路故障。设置在电抗器上的过热检测温度计,反应电抗器温度上升过高进行保护,但是该保护对电抗器温度上升有较长的响应时间,特别是感应点与匝间短路点较远时,更不易反应。文献[2]提出设置烟火报警器和设置电抗器端电压保护,前者效果和电抗器过热保护效果差不多,又由于电气化铁路母线电压不稳定的原因,电抗器端电压在很大范围变化,从而端电压不能反应匝间短路。

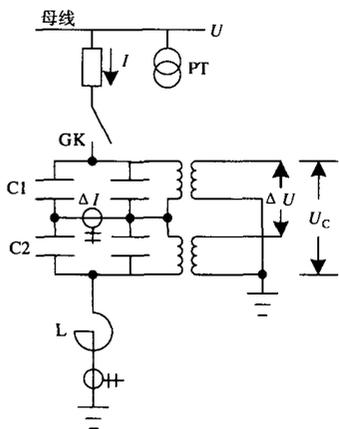


图1 牵引变电所并联电容补偿装置接线示意图

Fig. 1 Connection of shunt capacitance compensator in power traction substation

为了尽早发现电抗器故障并及时切除并补装置,避免事故扩大酿成大害,设置电抗器专用匝间短路保护是十分必要的。

2 电抗器匝间保护新原理

并补正常运行时,加载在电容器和电抗器上的电压的比值应该是一个相对恒定的量。当电抗器发生匝间短路故障时,电压模值比(以下简称电压比)由于电抗值的变小而变大。因此可以利用串联在并补支路上电容器、电抗器的电压比的变大判断电抗器匝间短路故障。因此,反应电抗器匝间短路的保护判据为:

$$r = \frac{U_C}{U_L} > r_{zd} \quad (1)$$

其中: U_L 、 U_C 分别为电抗器基波电压和电容器基波电压, r_{zd} 为电压比定值。在牵引变电所并补装置中,电容器电压 U_C 可由兼做电压互感器的电容器放电线圈获取,串联电抗器没有电压测量设备,可以通过并补母线电压与放电线圈电压之差获得。串联电抗器为空心电抗器,当发生最小匝间短路(1匝)时,空心电抗器阻抗变化可能达到4.8%~12.2%^[3],从而引起电压比 r 发生变化,定值 r_{zd} 可参考此设置。

防止母线电压互感器断线或母线无压时导致式

(1)出现电压比偏离稳态值,必须增加母线检有压判据,从而,电抗器匝间短路保护逻辑框图如图2。

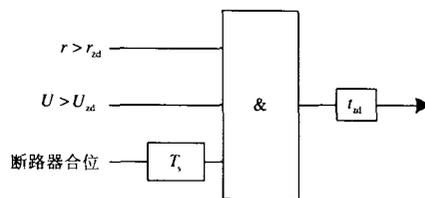


图2 电抗器保护逻辑框图

Fig. 2 The scheme of reactor protection against inter-turn fault

其中: U_{zd} 参考失压保护电压定值,取0.6倍母线电压,在断路器合闸后延时 T_s 方投入保护。

在并补投入的过程中,由于电容、电感均是储能元件,电容电压、电感电流不能突变,在合闸过程中会有充电及励磁的过程,致使电源中产生除工频信号以外的非周期(直流)分量及高次谐波分量,形成暂态过程。非周期分量及高次谐波分量在一定时间内衰减完毕,系统达到稳态。其大小取决于合闸时电源的状态、电容及电感的容量。非周期分量的衰减主要通过电容,而高次谐波分量的衰减主要通过电感,合闸瞬间电压的高低决定了非周期分量及高次谐波分量的大小及其衰耗所需时间。保护可以通过时延 T_s 避免误动。

3 仿真与测试

基于ATP暂态仿真软件,仿真参数采用京秦线电气化铁路某牵引变电所实际参数,其中,电抗器电抗153Ω,电容器组容抗1274.66Ω,母线额定电压55kV,仿真模型如图3所示。仿真忽略电抗器电阻,正常情况下,电压比 $r = \frac{1274.66}{153} \approx 8.33$,按电抗器电抗变化5%短路形式,此时 $r = \frac{1274.66}{153 \times (1 - 0.95)} \approx 8.77$,取 $r_{zd} = \frac{8.77 + 8.33}{2} \approx 8.55$ 。采样频率为20点/周波,电压计算采用全波递推傅氏变换进行,运算基于Matlab进行。以下仿真示例仅仅

按接触网空载或带负载、母线电压波动时电抗器匝间短路仿真均在电压相角为 90° 时进行。

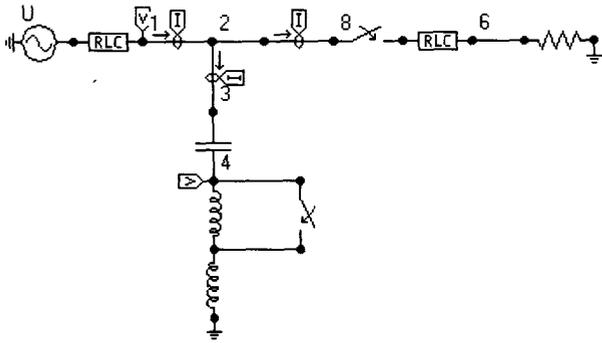


图3 电抗器保护 ATP 仿真模型

Fig.3 The reactor protection simulated model based on ATP

3.1 接触网 (OCS) 空载时发生匝间短路

接触网空载情况下,电抗器在 0.06 s 发生匝间短路,如图 4 所示,图中横、纵坐标分别为采样点、电压比(以下同),可以看出其电压比在故障后虽有抖动,但是电压比定值超出定值 8.55,保护可以快速动作。

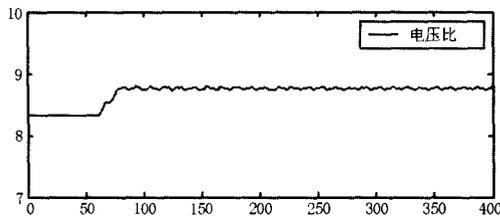


图4 接触网空载时发生电抗器匝间短路的电压比

Fig.4 The voltage ratio when inter-turn fault on reactor when OCS without load

3.2 接触网带负载时发生匝间短路

图 5 为电抗器正常运行情况下接触网馈线带一定负载时发生匝间短路,可以看出其电压比在故障后有短暂抖动,但是变化非常短暂,馈线负荷可以加速暂态过程衰减。当接触网故障时发生电抗器匝间短路,相当于接触网存在一个大负载,大量仿真表明,接触网牵引负荷或故障的存在可以加速暂态衰减。

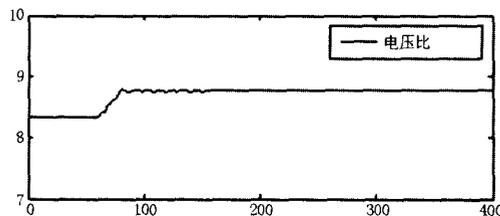


图5 接触网带负载时发生电抗器匝间短路的电压比

Fig.5 The voltage ratio when inter-turn fault on reactor when OCS with load

3.3 母线电压波动时保护性能

母线电压波动一般由于机车起动引起,图 6 为 0.06 s 时,机车起动引起电压暂降且电抗器此时发生匝间短路的情况。仿真表明,匝间短路后,电压比经过短暂的振荡后很快趋于稳定并超过定值 8.55,保护能够迅速动作。

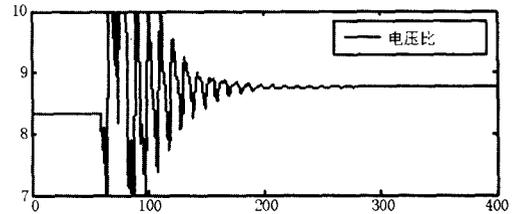


图6 机车起动时发生电抗器匝间短路的电压比

Fig.6 The voltage ratio when inter-turn fault on reactor when locomotive starting

图 7 为 0.06 s 时,机车起动引起电压暂降但电抗器没有发生匝间短路的情况。仿真表明,电压波动对电压比产生影响,但是经过短暂时间,电压比趋于正常稳定值,对于此种情况,带时限 t_{zd} 的电压比保护将可靠不动作。

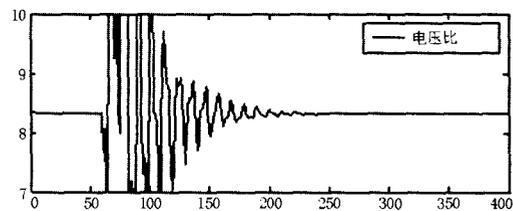


图7 机车起动引起电压暂降时的电压比

Fig.7 The voltage ratio when the voltage declines due to locomotive starting

大量仿真表明,在不同电压相角、不同运行状况下,按式基于电压比的电抗器匝间短路保护可以满足需要。

4 结论

针对目前电气化铁路并补装置保护不能保护电抗器匝间短路的不足,从电抗器匝间短路时其电容器与电抗器的电压比发生变化的特点出发,在不增加一次设备的情况下,提出了基于电容器、电抗器的电压比的匝间短路保护新原理,对电抗器发生匝间短路,均能快速动作。理论分析与仿真测试均证明了该匝间保护原理在接触网空载、故障时均能正确动作,在母线电压正常波动可靠不误动。该保护原理已经在京秦线某变电所得到了实际运用,运行效果良好。

(下转第 32 页 continued on page 32)

功源对节点的控制作用作为描述节点的特征是合理的。把本文分区结果与文献[6]结果比较,两种方法所得结果是相似的,文献[6]基于图论的嵌套分区法主要考虑的是电压稳定,而本文是从发电机的控制作用出发,二者的侧重点不同,因而具体分区结果略微不同,两种方法分区结果的相似从另一侧面证明本文方法是有效的。

4 结论

本文以发电机对负荷节点的控制作用作为每个PQ节点的特征,即用能反映节点受控情况的物理量来描述节点,这样做的原因是:在二级电压控制过程中,当系统母线电压变化时,自动电压控制系统通过调整发电机的无功出力消除中压母线电压变动。因此发电机对母线的控制作用就显得格外重要。在确定了系统负荷母线的特征向量后,经过对数据的标准化处理、构造相似矩阵、传递闭包法得到等价矩阵、选取不同的阈值聚类这几个步骤,最终将具有相同受控情况的节点聚为一类,达到了分区目的。其中动态聚类的过程有助于逐步观察各负荷母线的亲疏程度,从而得到全面精准的分区结果。对新英格兰39节点系统的计算验证了本文方法的合理性与有效性。

参考文献

- [1] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 505-511.
- [2] Stankovic A, Ilic M, Maratukulam D. Recent Results in Secondary Voltage Control of Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 94-101.
- [3] Sancha J L, Fernandez J L, Cortes A, et al. Secondary Voltage Control: Analysis, Solutions and Simulation Results for the Spanish Transmission System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 630-635.
- [4] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 221-224. WANG Yao-yu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. An Expert Knowledge Based Gubarea Division Method for Hierarchical and Distributed Electric Power System Voltage/var Optimization and Control [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224.
- [5] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40. GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Power Network Partitioning Based on Clustering Analysis in Mvar Control Space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.
- [6] 杨秀媛, 董征, 唐宝, 等. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 6-10. YANG Xiu-yuan, DONG Zheng, TANG Bao, et al. Power Network Partitioning Based on Fuzzy Clustering Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 6-10.
- [7] LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong. A Clustering Validation Based Method for Zone Number Determination in Network Partitioning for Voltage Control[J]. IEEE CNF, 2004, 2(1): 727-731.
- [8] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 208-221.

收稿日期: 2007-09-26; 修回日期: 2007-11-14

作者简介:

王颖(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制; E-mail: wangy177@126.com

彭建春(1964-), 男, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统优化运行、规划及其应用软件的开发等方面的研究工作;

何禹清(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制。

(上接第27页 continued from page 27)

参考文献

- [1] 刘让雄, 杨春江, 等. 电容补偿装置中电抗器烧损原因与保护措施[J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 78-80. LIU Rang-xiong, YANG Chun-jiang, et al. The Causes of Damage of Reactor in Capacitor Compensation Device and Protection Measures[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(3): 78-80.
- [2] 杨昌兴, 华水荣. 关于并联电容器用串联电抗器的保护问题[J]. 电力电容器, 2000, (1): 19-22. YANG Chang-xing, HUA Shui-rong. The Protection Problem of Series Reactor Used for Parallel Capacitors[J].

Electric Power Capacitor, 2000, (1): 19-22.

- [3] 王维俭. 电力系统主设备保护及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

收稿日期: 2007-02-01; 修回日期: 2008-04-07

作者简介:

林国松(1974-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为变电站综合自动化系统和故障测距; E-mail: linguosong@tom.com

李梦和(1976-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为计算机实时控制与仿真。