

智能真空开关投切不同负载控制策略研究

何妍¹, 陈轩恕¹, 刘飞¹, 许晶¹, 邱进¹, 张瑚²

(1. 国网电力科学研究院, 武汉 430074; 2. 中南电力设计院, 武汉 430071)

摘要: 智能真空开关主要应用在电容器组、电抗器组、空载线路和空载变压器的投切等4个方面,在输电线路自动重合闸以及短路电流开断方面还处于研究试验阶段。笔者目的是研究真空开关投切不同负载的控制策略。文中首先论述了选相投切的基本原理,然后分析了开关投切不同负载的操作过电压,最后选取电容器组和电抗器组作为容性负载和感性负载的典型,详细分析并总结了考虑预击穿、重燃与机械分散性等条件下,智能真空开关投切电容器组和电抗器组的最优控制策略。

关键词: 智能; 真空开关; 投切; 控制策略

中图分类号: TM643

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2011)10-0001-06

Research on Intelligent Vacuum Breaker Control Strategy in Switching Different Load

HE Yan¹, CHEN Xuan-shu¹, LIU Fei¹, XU Jing¹, QIU Jin¹, ZHANG Hu²

(1. States Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: Intelligent vacuum breakers is mainly applied in switching capacitor, inductance, on-load line and no-load transformer, and is applied on the stage of research in switching automatic reclosing transmission line and short-circuit current. Purpose of this paper is to study the vacuum switch switching control strategy for different loads. This paper firstly discusses the basic principle of phase selected, and then analyzes the over-voltage of switching different load. Lastly, it selects capacitor and inductance as the typical represents of capacitive load and inductance load, and detailedly analyzes and summaries the intelligent vacuum breaker optimal control strategy in switching different load in considering of advance breakdown, reignite and mechanical dispersion.

Key words: intelligent; vacuum switch; switching; control strategy

0 引言

开关的选相控制思想最早被提于20世纪70年代,多年来研究成果显著^[1]。目前,智能真空开关主要应用在电容器组、电抗器组、空载线路和空载变压器的投切等4个方面,在输电线路自动重合闸以及短路电流开断方面还处于研究试验阶段^[2-4]。

1 开关操作过电压及选相投切原理

真空开关在关合负荷电流及开断故障电流时进行的操作会产生过电压及涌流,会危及设备的绝缘

及电力系统的稳定。选相投切技术的基本原理就是控制开关在参考信号最佳相角处关合或开断。

1.1 容性负载操作过电压原理

电容器组、空载电缆和空载架空线等一类负载属于容性负载,操作这些负载的共同特点为断路器断口受到的威胁不是恢复电压的陡度而是其绝对值。操作这些容性负载的差异在于开断电流不同,空载电缆和空载架空线的电流小,它们分别不超过100 A和10 A;电容器组的电流则随其电容量而定,一般从几十安至几百安为常见^[5-9]。

关合容性负载时,当电容上无起始电压时,若在电源电压零值时刻合闸,就不会产生过电压;若在电

收稿日期:2011-05-15; 修回日期:2011-06-06

基金项目:国家电网重点科研项目资助(SG0846);国家科技部支撑计划(2009BAA19B00)。

Project Supported by Research Foundation of State Grid (SG0846), Ministry of Science and Technology of the PRC(2009BAA19B00).

源电压峰值时刻合闸,便会产生2倍过电压。

开断容性负载时,如果出现多次燃弧,将会产生3、5、7……倍过电压,使电容以及电网中其他设备的绝缘受到严重威胁。

1.2 感性负载操作过电压原理

空载变压器、电抗器及空载电动机等都属于感性负载,对这些感性负载的操作过程中,可能会产生幅值较高的过电压。

当在电压最大值时刻合闸,此时磁通的瞬时值为零,不会发生过渡过程。当在电压零值时刻合闸,此时磁通为最大值,过渡过程最剧烈。以上是铁心中没有剩磁的情况。若铁心中有剩磁,那么过电压幅值会更大。

开断感性负载时,电流的电弧可能在自然过零前强制熄灭,甚至电流在接近幅值时被突然截断,截流是产生开断感性负载过电压的根本原因。

2 并联电容器组的选相投切策略

2.1 星形中性点不接地方式

2.1.1 选相关合策略

在60 kV及以下电力系统中常采用中性点不接地或经消弧线圈接地的方式。进行选相关合时,常用的策略为选择首合相在该相电压零点时刻合闸,第二关合则在该相电压与首合相电压相等时投入。最后一相则在其自然过零时关合^[10-19]。

参考信号可以选择相电压或者线电压,它们具有不同的关合时序。以相电压和线电压为参考信号的关合时序见图1。以相电压为参考信号时,假设以a相电压 u_a 为参考信号,参考零点为点 R_1 ,选择首合相 u_c 在其电压零点A处关合,第二关合相 u_b 在其相电压与首合相 u_c 电压相等时点B处投入,最后一相 u_a 在随后的自身过零点C处投入。图1所示选相关合顺序为 $u_c-u_b-u_a$ 。相对于参考零点 R_1 ,三相分闸相位分别滞后 60° 、 90° 、 180° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为3.33、5、10 ms。以线电压为参考信号时,假设以 u_{ab} 为参考信号,图1所示选相关合顺序为 $u_a-u_c-u_b$,参考零点为点 R_2 ,三相合闸点D、E、F相位分别滞后 30° 、 60° 、 150° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为1.67、3.33、8.33 ms。

2.1.2 开断策略

根据电工理论可知,电压过零点与电容开断时电流过零点之间具有固定关系。对中性点不接地补偿电容器组,可采取先开断一相补偿电容器组,延时1/4周期后,再同时开断后两相的同步开断策略。参考信号可以选择相电压或者线电压,它们具有不同的开断时序。图2为以相电压和线电压为参考信

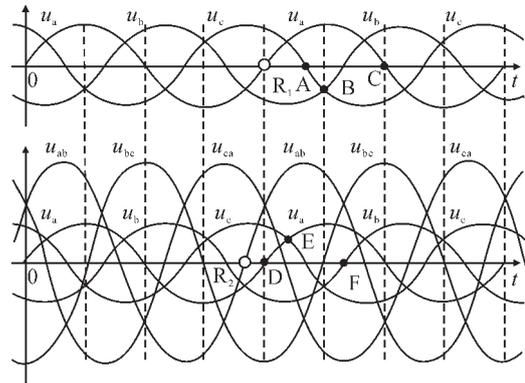


图1 中性点不接地三相电容器组关合时序图

Fig.1 Ungrounded three-phase capacitor bank closing timing diagram

号的开断时序。以相电压为参考信号时,假设以a相电压 u_a 为参考信号,参考零点为点 R_1 ,选择首分相 i_a 在电流零点A处开断,第二开断相 i_b 和 i_c 在其两者电流相等时点B处同时开断。图2所示选相开断顺序为 $i_b-(i_a+i_c)$,相对于参考零点 R_1 ,三相分闸相位分别滞后 30° 、 120° 、 120° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为1.67、6.67、6.67 ms。以线电压为参考信号时,假设以 u_{ab} 为参考信号,图2所示选相开断顺序为 $i_b-(i_a+i_c)$,参考零点为点 R_2 ,三相分闸相位分别滞后 60° 、 150° 、 150° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为3.33、8.33、8.33 ms。

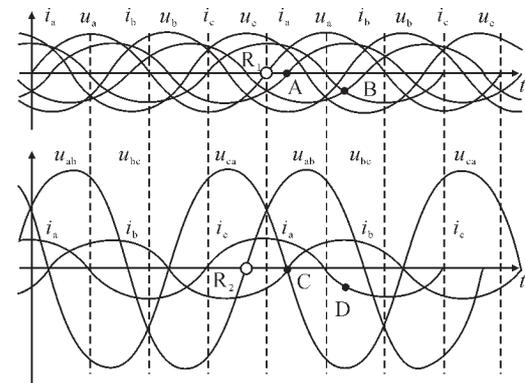


图2 中性点不接地三相电容器组开断时序图

Fig.2 Ungrounded three-phase capacitor bank breaking timing diagram

2.2 星形中性点接地方式

2.2.1 关合策略

在110 kV及以上电力系统中常采用中性点直接接地方式。在对其进行同步关合时,由于开关每相触头间隙两端的电压为相电压,因此,其关合策略与单组电容器的一样,即同步关合的最佳相位在每相电压过零时刻。一般选择相电压作为参考信号。关合时序见图3,假设参考信号为a相电压 u_a ,选

相关合顺序为 $u_c-u_b-u_a$,相对于参考零点 R_0 ,三相合闸点A、B、C相位分别滞后 60° 、 120° 、 180° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为3.33、6.67、10 ms。

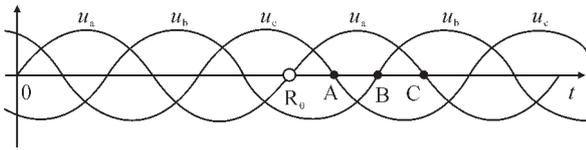


图3 中性点接地三相电容器组合闸时序图

Fig.3 Three-phase capacitor bank neutral grounding closing timing diagram

2.2.2 开断策略

对中性点接地补偿电容器组,其同步开断策略与单组电容器开断策略相同。一般选择相电压作为参考信号。开断时序见图4,假设参考信号为a相电压,选相关合顺序为 $i_b-i_a-i_c$,相对于参考零点 R_0 ,三相合闸点A、B、C的相位分别滞后 30° 、 90° 、 150° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为1.67、5、8.33 ms。

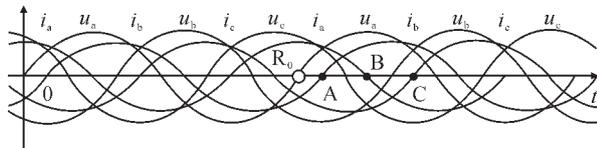


图4 中性点接地三相电容器组开断时序图

Fig.4 Three-phase capacitor bank neutral grounding breaking timing diagram

2.3 三角形连接方式

三角形连接方式主要用于低压网络,对于中压10 kV系统,补偿容量小于300 kvar的电容器组也可接成三角形。三角形连接方式下,每组电容器的最佳合闸时刻对应线电压过零时刻。因此一般选择线电压为参考信号。三角形连接三相电容器组合闸时序见图5,假设参考信号为线电压 u_{ab} ,选相关合顺序为 $u_{ca}-u_{bc}-u_{ab}$,相对于参考零点 R_0 ,三相合闸点A、B、C相位分别滞后 60° 、 120° 、 180° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为3.33、6.67、10 ms。

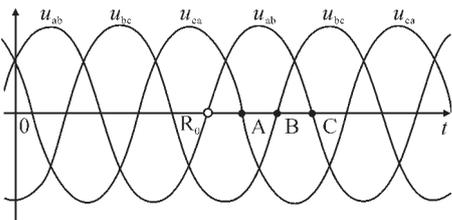


图5 三角形连接三相电容器组合闸时序图

Fig.5 Three-phase delta connected capacitor bank closing timing diagram

三角形连接方式下,每组电容器的最佳开断时刻对应线电流过零时刻。一般选择线电压为参考信

号。三角形连接三相电容器组开断时序见图6,假设参考信号为线电压 u_{ab} ,选相关合顺序为 $i_{bc}-i_{ab}-i_{ca}$,相对于参考零点 R_0 ,三相合闸点A、B、C相位分别滞后 30° 、 90° 、 150° ,对于50 Hz系统,滞后的时间分别为1.67、5、8.33 ms。

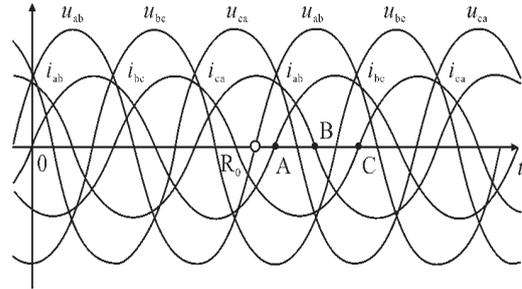


图6 三角形连接三相电容器组开断时序图

Fig.6 Three-phase delta connected capacitor bank breaking timing diagram

2.4 电容器组投切策略小结

表1、2总结了电容器组选相投切距离参考零点的延时关系。

表1 电容器组选相投切距离参考零点的延时

Tab.1 Capacitor selected phase delay from the reference point

电容器组 连接方式	投切 方式	参考 电压	关合 顺序	A相 /ms	B相 /ms	C相 /ms
星形中性点 不接地	关合	u_a	c-b-a	10.00	5.00	3.33
		u_b	a-c-b	3.33	10.00	5.00
		u_c	b-a-c	5.00	3.33	10.00
	开断	u_{ab}	a-c-b	1.67	8.33	3.33
		u_{bc}	b-a-c	3.33	1.67	8.33
		u_{ca}	c-b-a	8.33	3.33	1.67
星形 中性点接地	关合	u_a	b-a+c	6.67	1.67	6.67
		u_b	c-b+a	6.67	6.67	1.67
		u_c	a-b+c	1.67	6.67	6.67
	开断	u_{ab}	b-a+c	8.33	3.33	8.33
		u_{bc}	c-b+a	8.33	8.33	3.33
		u_{ca}	a-b+c	3.33	8.33	8.33

2.5 预击穿与机械分散性的最佳合闸相位

开关的预击穿特性主要由开关灭弧介质和开关关合速度决定。定义 k 为关合系数,并令

$$k = Ev / (\omega U_m) \tag{1}$$

当 $k \geq 1$ 时,开关的绝缘衰减率RDDS总是不小

响,可得三相关关两端电压分别为

$$\begin{cases} u_a(t) = U_m \sin \omega t \\ u_b(t) = U_m \left[-\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{m+1} \right) \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right] \\ u_c(t) = U_m \left\{ \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{m+2} \left[\sin \omega t + \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \right\} \end{cases} \quad (5)$$

分别对上面3个电压表达式求最大值,可得三相关关最佳关合时刻分别为

$$\begin{cases} \omega t_a = \frac{\pi}{2} \\ \omega t_b = \arctan \left(-\frac{1 + \frac{1}{1+m}}{\sqrt{3}} \right) \\ \omega t_c = \frac{7\pi}{6} \end{cases} \quad (6)$$

$$U_c(t_c) = U_m \left(1 + \frac{1}{m+2} \right) \quad (7)$$

可知,c相电压的最佳关合相位始终为 $7\pi/6$,只有其峰值随着 m 变化。

考虑预击穿、RDDS与机械分散性(ΔT)的影响时,可得三相实际最佳关合时刻为

$$\begin{cases} t'_a = \frac{T}{4} + \frac{\cos(\omega \cdot \Delta T)}{\omega K} \\ t'_b = t_b + \frac{U_b(t_b) \cdot \cos(\omega \cdot \Delta T)}{\omega K U_m} \\ t'_c = \frac{7T}{12} + \frac{U_c(t_c) \cdot \cos(\omega \cdot \Delta T)}{\omega K U_m} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: T 为系统周期, K 为关合系数。

3.2 分断策略

最佳关合相位的确定是为了减少截流或复燃引起的过电压。因为通常复燃过电压比截流过电压严重,所以必须使得触头分离和随后电流过零之间的时间间隔大于开关的最小燃弧时间。又因为每相的电流过零预期需要用来确定触头分离时刻,所以也需要考虑中性点电抗器的影响。如图9,假设首合相为a相,a相电流过零点可由正常电流波形预测,不受中性点电抗器的影响。a相分断后,对 L_g 上的电压产生影响,进而使c相电流过零点发生改变。c相关关分断瞬间电抗器 L 上的电压为

$$U_L(t) = \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{m+2} \left[\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (9)$$

从而推得电流过零相位为

$$\omega t = \arctan \left(-\frac{\sqrt{3}m}{m+2} \right) \quad (10)$$

以a相电压零点为参考点,a相电流过零点滞后

参考零点 90° 。c相在电流过零点附近区间。最后b相在过零点分断。如果中性点不接地,b和c两相相应同时分断。

4 结语

文中首先论述了选相投切的基本原理,然后分析了开关投切不同负载的操作过电压,最后选取电容器组和电抗器组作为容性负载和感性负载的典型,详细分析并总结了考虑预击穿、重燃与机械分散性等条件下,智能真空开关投切电容器组和电抗器组的最优控制策略。

参考文献:

- [1] 邹积岩.智能电器[M].北京:机械工业出版社,2006.
ZOU Ji-yan.Intelligent apparatus[M].Beijing:China Machine Press,2006.
- [2] 王季梅.真空开关理论及其应用[M].西安:西安交通大学出版社,1986.
- [3] 林莘.永磁机构与真空断路器[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [4] 王季梅.真空开关技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [5] 丁富华,邹积岩,段雄英.相控开关的最佳投切相位研究[J].高压电器,2005,41(6):408-411.
DING Fu-hua,ZOU Ji-yan,DUAN Xiong-ying.Research on optimum switching phase of phasing switches[J].High Voltage Apparatus,2005,41(6):408-411.
- [6] 丁富华.真空开关的选相控制及其应用研究[D].大连:大连理工大学博士学位论文,2006.
DING Fu-hua.Research on controlled vacuum switches and their applications[D].Dalian:Dalian University of Technology,2006.
- [7] 段雄英,廖敏夫,丁富华,等.相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J].高压电器,2007,43(2):113-117.
DUAN Xiong-ying,LIAO Min-fu,DING Fu-hua,et al. Application and key technology analysis of controlled switching[J].High Voltage Apparatus,2007,43(2):113-117.
- [8] 钱家骊,袁大陆,徐国政.对1000kV电网操作过电压及相位控制高压断路器的讨论[J].电网技术,2005,29(10):1-8.
QIAN Jia-li,YUAN Da-lu,XU Guo-zheng. Discussion on switching overvoltage in 1000kV power networks and phase controlled circuit breaker[J].Power System Technology,2005,29(10):1-8.
- [9] 陈振生.高压断路器同步合、分闸技术及应用[J].电气技术,2006(12):49-58.
CHEN Zhen-sheng. Synchronous high-voltage circuit breakers, sub-gate technology and application[J].Electrical

- Engineering, 2006(12):49-58.
- [10] 方春恩, 邹积岩, 丛吉远, 等. 并联电容器组同步投切策略的研究[J]. 电力设备, 2004, 5(9): 18-20.
FANG Chun-en, ZOU Ji-yan, CONG Ji-yuan, et al. Study on synchronous switching strategy of shunt capacitor unit[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(9): 18-20.
- [11] 韩彦华, 石少敏, 王 森. 投切并联电容器过电压研究[J]. 电力电容器, 2007, 28(1): 5-8.
HAN Yan-hua, SHI Shao-min, WANG Sen. Study on over-voltage occurred in switching shunt capacitor banks[J]. Power Capacitor, 2007, 28(1): 5-8.
- [12] 王忠清, 杨建宁. 谈晶闸管投切电容器TSC的触发电路[J]. 电力电容器, 2007, 28(4): 30-36.
WANG Zhong-qing, YANG Jian-ning. The trigger circuit for thyristor switched capacitor(TSC)[J]. Power Capacitor, 2007, 28(4): 30-36.
- [13] 岳地松. 10 kV 并联补偿电容器保护的整定[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(5): 26-28.
YUE Di-song. Protection setting for 10 kV shunt compensation capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(5): 26-28.
- [14] 徐林峰. 一起干式空心串联电抗器的故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(2): 50-54.
XU Lin-feng. Fault analysis of dry-type air-core series reactor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(2): 50-54.
- [15] 李六零, 邱毓昌. 相位控制高压断路器在配电网中的应用[J]. 高压电器, 2002, 38(1): 40-42.
LI Liu-ling, QIU Yu-chang. Application of the phase-controlled high voltage circuit breaker in power distribution networks[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38 (1): 40-42.
- [16] 丁忠前. 并联电容器组相控投切技术研究[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2007.
DING Zhong-qian. Research on synchronous switching of shunt capacitor banks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [17] 陈旭平. 电容器组涌流、谐波[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(5): 47-50.
CHEN Xu-Ping. A fault analysis of capacitor bank explosion caused by inrush and harmonic current[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29 (5): 47-50.
- [18] 农为踊, 程汉湘, 陈发纲, 等. 复合型晶闸管投切电容器装置设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(6): 45-47.
NONG Wei-yong, CHENG Han-xiang, CHEN Fa-gang, et al. The design of compound thyristor switched capacitor device [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(6): 45-47.
- [19] 李智敏, 南春雷, 马 力, 等. 并联电容器分闸重击穿操作过电压研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(3): 41-47.
LI Zhi-min, NAN Chun-lei, MA Li, et al. Study of restrike overvoltage when switching off shunt capacitors [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30 (3): 41-47.
- [20] LEE W Y, PARK K Y, CHONG J K, et al. A method to decide the switching instants of controlled switching circuit breaker for shunt reactors[J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002, 3(10): 1760-1765.
- [21] 时燕新. 真空断路器投切并联电抗器过电压实例研究[J]. 华北电力技术, 2005(6): 5-8.
SHI Yan-xin. Research on vacuum circuit breaker switching shunt capacitor overvoltage[J]. North China Electric Power, 2005(6): 5-8.
- [22] 李召家, 黎东升. 真空断路器投切并联电抗器试验研究[J]. 广东电力, 2003, 16(4): 29-33.
LI Zhao-jia, LI Dong-sheng. Experimental research of vacuum circuit breaker opening-closing shunt reactor[J]. Guangdong Electric Power, 2003, 16(4): 29-33.
- 何 妍(1983—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为高压电器的研究与应用。

简 讯

土耳其能源部长称计划修建核电站

据法新社自安卡拉报道, 土耳其能源部长塔纳尔·伊尔迪兹周一就将土耳其对能源进口的依赖降至最低做出强调。他说: 土耳其正在着手与各公司和国家举行修建核电站谈判。土耳其能源部长说: 安卡拉为在土耳其北部修建核电站会考虑美国提出任何形式的建议。

土耳其能源部长之前也曾宣布: 该国计划到 2023 年在该国修建 12 座核电站。2010 年, 土耳其和俄罗斯达成协议, 俄罗斯在该国南部省市修建首座核电站。