

文章编号: 1000-582X(2012)09-070-10

线路两相短路故障电流控制的新方法

江 渝, 王 恒, 郑群英, 张志刚, 刘和平

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 两相短路后, 传统方法是切除故障线路, 但这可能导致系统潮流大转移并可能引起系统不稳定, 造成大面积停电事故。为此提出一种新型的故障电流控制器及与之对应的控制方法。故障电流控制器由串联变压器、并联变压器、2 个可调电感以及有载调节开关构成, 嵌入在线路的两端, 工作时等效于电压源和电感的串联。两相故障后, 改变与并联变压器原边相连开关的位置, 将改变故障电流控制器等效电压源电压的相位, 使故障相线路发送端(接受端)的电压源电压与超前(滞后)于故障相的电源电压同相, 再协调控制 2 个可调电感, 能独立控制其等效电压源电压的幅值和电感值, 适当地控制这 2 个分量, 能控制故障相间的线电流等于正常电流, 该状态下线路的故障电流不仅为 0, 同时故障线路的电流也等于其正常运行时的电流, 并在此基础上提出了两相短路故障电流的控制策略, 建立了与之对应的控制系统。该方法能保持故障线路的继续运行, 提高了线路供电的可靠性。实验证明了故障电流控制器能控制故障线路上的电流, 使其等于正常运行电流, 同时理论分析和仿真结果也证明了提出的故障电流控制器以及与之对应的两相短路电流的控制原理、控制策略的正确性。

关键词: 两相短路; 电抗器; 故障电流; 电压控制; 实时控制; 控制器

中图分类号: TM732

文献标志码: A

A novel control method for two-phase short current of lines

JIANG Yu, WANG Heng, ZHENG Qunying, ZHANG Zhigang, LIU Heping

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The tremendous power flow may be transferred when two-phase short line is shut down, which may result in unstable state of the system and large loss of electric power. A novel line fault current controller (LFCC) and control method for the fault current of the two-phase short are presented. LFCC, emdedded at the line terminal, is composed of a series-connection transformer, a shunt-connection transformer, 2 controllable inductors and on-line taps and is equivalent to the series of the insertion voltage and the insertion inductor when it works. The insertion voltage at the sending terminal(receiving terminal) is controlled to lead (lag) the fault source voltage by $2\pi/3$ by adjusting on-line taps states. Because the insertion voltage amplitude and the insertion inductance can be controlled independently, the fault current gets zero and the current through the fault line reaches the normal current by the appropriate control of the insertion voltage amplitudes and the insertion inductances. Therefore, the fault line keeps the operation and the current through the line during the two-phase short existing equals that in normal operation, which

收稿日期: 2012-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50777066)

作者简介: 江渝(1964-), 男, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事电力电子在电力系统中应用的研究, (E-mail) ceeyjiang@cqu.edu.cn.

improves the supply reliability. In addition, the corresponding control strategy for two phase short current is proposed. The experiment results show that the proposed LFCC is able to control the fault current through the line to reach corresponding normal current. The proposed control method suited for the proposed LFCC for the two phase short current is verified with the simulation results.

Key words: two-phase short; inductors; fault currents; voltage control; real time control; controller

线路发生故障后,传统方法是將故障线路切除以保证系统的正常运行,有效地限制故障电流对切除故障线路具有重要的意义,因此目前国内外学者提出了许多限制故障电流的方法,利用超导材料构成的故障电流限制器具有较好的性能,但是利用超导材料构成的故障电流限制器距离实际应用还有相当的距离^[1];利用永磁材料构成故障电流限制器,也具有较好的电流限制作用^[2];还有学者利用电力电子技术,提出一些具有故障电流限制作用的拓扑电路^[3-4]。但是,即使性能非常优越的故障电流限制器,其目标也是限制故障状态下的线路电流,等到断路器切除故障线路,切除的线路如果为重载关键线路,则将引起系统潮流大转移,并可能使多条线路过载而被切除,从而引起大面积停电事故。在国外发生的、产生了重大损失的有些大停电事故,其最初起因就是系统中关键线路被切除^[5]。

但是,线路发生三相短路(或三相短路接地)的概率较低,其主要故障类型为不对称故障,而目前对单相接地故障而言,利用消弧线圈能够控制其故障电流为0,并保持线路电流等于故障前的电流^[6-10]。目前还没有相关文献报道线路发生两相短路时,如何有效地控制短路电流为0,保持故障线路上的电流等于故障前的电流,以进一步提高线路供电的可靠性。

由此,笔者提出一种新型的两相短路故障电流的控制方法以及与之对应的故障电流控制器。该方法的新颖性表现在:首先,故障电流控制器的结构是完全新型的,由变压器、可调开关等元件构成,这些元件在电力系统中运行多年,也为该装置在电力系统中的推广和应用提供了条件;其次,完全新型的故障电流控制器就决定了与之对应的控制策略和控制方法是完全新型的;最后,得到的结果也是完全新型的,它控制两相短路故障电流为0,并保持故障线路

的继续运行,且使故障线路上的电流等于故障前的电流。

1 两相短路故障电流的控制原理

图1为具有故障电流控制器的简单电力系统模型,其中 \dot{U}_M 和 \dot{U}_{M1} (M 表示A、B、C相的参数,下同)分别为线路S端和 S_1 端的电压, \dot{U}_M 超前 \dot{U}_{M1} δ ,S端和 S_1 端为线路有功功率的发送端(简称发送端,下同)和接受端(简称接受端,下同)。故障电流控制器等效于电压源 \dot{U}_{KSM} (或 \dot{U}_{KSM1})和电感 L_{KSM} (或 L_{KSM1})的串联,当它处于备用状态时, \dot{U}_{KSM} (或 \dot{U}_{KSM1})和 L_{KSM} (或 L_{KSM1})均等效为0。故障电流控制器的结构和工作原理将在后面介绍。线路正常运行期间故障电流控制器处于备用状态,线路两端的电流分别为 \dot{I}_M 、 \dot{I}_{M1} ;两相短路且故障电流控制器投入后,线路两端的电流则为 \dot{I}_{MF1} 、 \dot{I}_{M1F1} ,如图1所示。由于输电线路的电抗本身就远大于其电阻,而故障电流控制器的等效串联电感将进一步减小线路电阻对故障电流的影响,因此图1中线路模型为最简单的电感模型,F点两侧每相线路的电感分别为 kL 和 $(1-k)L$ (其中 k 为0~1之间的常数,它表征了F点的位置)。以线电压 \dot{U}_{BC} 为参考电压,则正常运行期间线路S端和 S_1 端B、C相间的线电流 \dot{I}_{BC} 和 \dot{I}_{B1C1} 分别为

$$\begin{aligned}\dot{I}_{BC} &= (U_{BC} - U_{B1C1} \cos\delta + jU_{B1C1} \sin\delta) / j\omega L, \\ \dot{I}_{B1C1} &= (-U_{BC} + U_{B1C1} \cos\delta - jU_{B1C1} \sin\delta) / j\omega L,\end{aligned}\quad (1)$$

其中 U_{BC} 和 U_{B1C1} 分别为线路S端和 S_1 端B、C相间线电压的幅值。

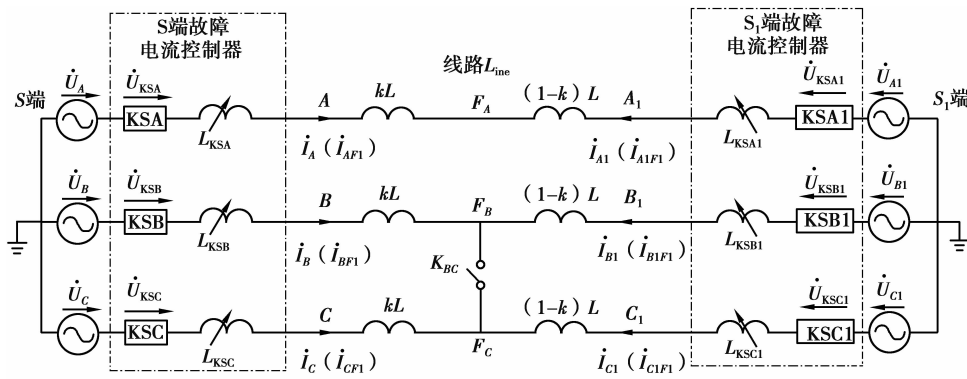


图 1 简单电力系统模型

线路的 B、C 相在 F 点发生短路故障(两相短路)后,启动 S 端 B 相和 C 相的故障电流控制器,控制其等效电抗均为 X_L ,其等效电压源电压 \dot{U}_{KSB} 、 \dot{U}_{KSC} 分别为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KSB} &= k_s \dot{U}_A, \\ \dot{U}_{KSC} &= k_s \dot{U}_B, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 k_s 为实数,即 B、C 相的串联电压分别与超前于 B 相和 C 相(故障相)的电源电压 \dot{U}_A 和 \dot{U}_B 同相,同时保持它们的幅值相等。因此线路 S 端的 B 相电流 \dot{I}_{BF1} 和 C 相电流 \dot{I}_{CF1} 分别为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BF1} &= \frac{\dot{U}_B + \dot{U}_{KSB} - \dot{U}_{FB1}}{j(\omega kL + X_L)}, \\ \dot{I}_{CF1} &= \frac{\dot{U}_C + \dot{U}_{KSC} - \dot{U}_{FC1}}{j(\omega kL + X_L)}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 \dot{U}_{FB1} 等于 \dot{U}_{FC1} ,它们分别为故障点 F 处的 B 相电压和 C 相电压。根据式(2)和式(3),线路 S 端 B、C 相间的故障线电流 \dot{I}_{BCF1} 为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BCF1} &= \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C + \dot{U}_{KSB} - \dot{U}_{KSC}}{j(\omega kL + X_L)} \\ &= \frac{\dot{U}_{BC} + k_s \dot{U}_{AB}}{j(\omega kL + X_L)} = \frac{U_{BC} + k_s U_{BC} e^{j2\pi/3}}{j(\omega kL + X_L)} \\ &= \frac{U_{BC} + k_s U_{BC} \cos(2\pi/3) + j k_s U_{BC} \sin(2\pi/3)}{j(\omega kL + X_L)}, \end{aligned} \quad (4)$$

使得

$$k_s = \frac{U_{B1C1} \sin \delta}{U_{BC} \sin \frac{2\pi}{3} - U_{B1C1} \sin \left(\frac{2\pi}{3} + \delta \right)}, \quad (5)$$

则

$$\frac{U_{BC} + k_s U_{BC} \cos(2\pi/3)}{U_{BC} - U_{B1C1} \cos \delta} = \frac{k_s U_{BC} \sin(2\pi/3)}{U_{B1C1} \sin \delta} = m_{BC}, \quad (6)$$

其中 m_{BC} 为它们之间的比值。同时再控制 X_L 等于:

$$X_L = \omega(m_{BC} - k)L. \quad (7)$$

根据式(1)、式(4)、式(5)和式(7),在短路状态下,S 端的线电流 \dot{I}_{BCF1} 等于正常运行时的线电流 \dot{I}_{BC} ,即

$$\dot{I}_{BF1} - \dot{I}_{CF1} = \dot{I}_B - \dot{I}_C = \dot{I}_{BC}. \quad (8)$$

启动 S₁ 端的 B 相和 C 相故障电流控制器,控制其输出等效电抗均为 X_L ,等效电压源电压 \dot{U}_{KSB1} 、 \dot{U}_{KSC1} 分别为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KSB1} &= k_{s1} \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{KSC1} &= k_{s1} \dot{U}_A, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 k_{s1} 为实数,即 B、C 相的串联电压分别与滞后于 B 相和 C 相(故障相)的电源电压 \dot{U}_C 和 \dot{U}_A 同相,同时保持它们的幅值相等。则 S₁ 端的 B、C 相故障电流 \dot{I}_{B1F1} 和 \dot{I}_{C1F1} 分别为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{B1F1} &= \frac{\dot{U}_{B1} + \dot{U}_{KSB1} - \dot{U}_{FB1}}{j(\omega(1-k)L + X_{L1})}, \\ \dot{I}_{C1F1} &= \frac{\dot{U}_{C1} + \dot{U}_{KSC1} - \dot{U}_{FC1}}{j(\omega(1-k)L + X_{L1})}, \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10),S₁ 端 B、C 相间的线电流 \dot{I}_{B1C1F1} 为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{B1C1F1} &= \frac{\dot{U}_{B1} - \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{KSB1} - \dot{U}_{KSC1}}{j(\omega(1-k)L + X_{L1})} \\ &= \frac{\dot{U}_{B1C1} + k_{s1} \dot{U}_{C1A1}}{j(\omega(1-k)L + X_{L1})} \\ &= \frac{U_{B1C1} e^{-j\delta} + k_{s1} U_{B1C1} e^{-j(\delta+2\pi/3)}}{j(\omega(1-k)L + X_{L1})} \end{aligned}$$

$$= \left(U_{B1C1} \cos\delta + k_{S1} U_{B1C1} \cos\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) - j \left(U_{B1C1} \times \sin\delta + k_{S1} U_{B1C1} \sin\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) / j(\omega(1-k)L + X_{L1}), \quad (11)$$

使得

$$k_{S1} = \frac{U_{BC} \sin\delta}{U_{B1C1} \sin\frac{2\pi}{3} - U_{BC} \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \delta\right)}, \quad (12)$$

则

$$\frac{U_{B1C1} \cos\delta + k_{S1} U_{B1C1} \cos\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right)}{-U_{BC} + U_{B1C1} \cos\delta} = \frac{U_{B1C1} \sin\delta + k_{S1} U_{B1C1} \sin\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right)}{U_{B1C1} \sin\delta} = m_{BC1}. \quad (13)$$

其中 m_{BC1} 为它们的比值。控制 X_{L1} 为

$$X_{L1} = \omega L (m_{BC1} - 1 + k). \quad (14)$$

则 S_1 端 B, C 相间的线电流 \dot{I}_{B1C1F1} 等于正常运行时线路的线电流 \dot{I}_{B1C1} , 即

$$\dot{I}_{B1F1} - \dot{I}_{C1F1} = \dot{I}_{B1} - \dot{I}_{C1} = \dot{I}_{B1C1}. \quad (15)$$

根据式(1)、式(8)、式(15)和图1则有

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BF1} - \dot{I}_{CF1} &= -(\dot{I}_{B1F1} - \dot{I}_{C1F1}), \\ \dot{I}_{BF1} + \dot{I}_{CF1} + \dot{I}_{B1F1} + \dot{I}_{C1F1} &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BF1} + \dot{I}_{B1F1} &= 0, \\ \dot{I}_{CF1} + \dot{I}_{C1F1} &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

根据式(17)和图1,该状态下线路的故障电流为0。同时,该状态下线路 B 相两端的电流 \dot{I}_{BF1} 和 \dot{I}_{B1F1} 则为

$$\dot{I}_{BF1} = -\dot{I}_{B1F1} = \frac{\dot{U}_B + \dot{U}_{KSB} - \dot{U}_{B1} - \dot{U}_{KSB1}}{j(\omega L + X_L + X_{L1})}. \quad (18)$$

正常运行期间,由于线路两端电压幅值的差异较小,忽略其差异,即式(5)、式(6)、式(12)和式(13)中 U_{BC} 等于 U_{B1C1} , 则式(18)可简化为

$$\dot{I}_{BF1} = -\dot{I}_{B1F1} = \frac{(\dot{U}_B - \dot{U}_B e^{-j\delta}) - (\dot{U}_{B1} - \dot{U}_{B1} e^{j\delta})}{2j\omega L}. \quad (19)$$

同时:

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} e^{j\delta} \\ \dot{U}_{B1} &= \dot{U}_B e^{-j\delta}. \end{aligned} \quad (20)$$

则式(19)可进一步简化为

$$\dot{I}_{BF1} = -\dot{I}_{B1F1} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{B1}}{j\omega L}. \quad (21)$$

由此可知,故障状态下线路 B 相两端的电流 \dot{I}_{BF1} 和 \dot{I}_{B1F1} 等于其正常运行电流 \dot{I}_B 和 \dot{I}_{B1} 。与 B 相故障电流的情况相同,此时线路 C 相两端的故障电流也等于其正常运行电流,而 B, C 相间的短路故障对线路的 A 相电流没有影响,因此,该状态下,线路两端的 3 相电流均等于正常电流。

由此还可知,两相短路后,在线路故障相的两端串联电压和电感,使发送端的串联电压与超前于故障相的电源电压同相,接受端的串联电压与滞后于故障相的电源电压同相,适当地控制串联电压的幅值和串联电感的值,能控制故障电流为 0,同时故障线路上的电流等于正常运行时的电流。

2 故障电流控制器的工作原理

图2为在线路 S 端的 A 相装有故障电流控制器的示意图。故障电流控制器由并联变压器 T_1 、串联变压器 T_2 、可调电感 L_B, L_C 以及开关 S_{K1} 和 S_{KS} 构成。图2中的 $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BB}, \dot{U}_{CB}$ 分别为 A 相、 B 相和 C 相备用电源,它们分别等于 $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ 。工作时故障电流控制器中的 S_{KS} 处于断开状态。根据图2, T_1 的副边电压 \dot{U}_{CS} 为

$$\dot{U}_{CS} = m \dot{U}_S. \quad (22)$$

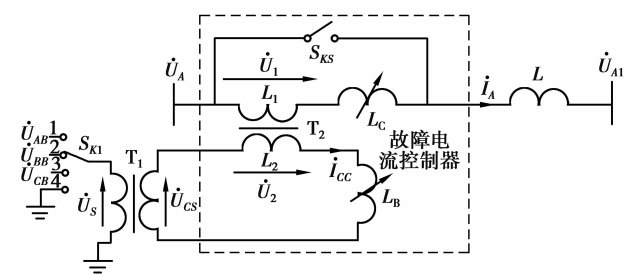


图2 故障电流控制器的结构原理图

其中 m 为 T_1 的变压比, \dot{U}_S 为 T_1 的原边电压。根据变压器 T_2 的工作原理和故障电流控制器的结构得

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_A + j\omega M \dot{I}_{CC}, \\ \dot{U}_2 &= j\omega L_2 \dot{I}_{CC} + j\omega M \dot{I}_A, \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_{CS} - j\omega L_B \dot{I}_{CC}, \end{aligned} \quad (23)$$

其中: L_1, L_2, M 为 T_2 的原边绕组电感、副边绕组电

感和原、副边绕组之间的互感; \dot{I}_A 为 T_2 的原边电流,也等于线路电流; \dot{U}_1 为 T_2 的原边电压; \dot{I}_{C2} 为 T_2 的副边电流; \dot{U}_2 为 T_2 的副边电压。根据式(23), \dot{U}_1 为

$$\dot{U}_1 = \frac{M\dot{U}_{CS}}{L_2 + L_B} + j\omega\left(L_1 - \frac{M^2}{L_2 + L_B}\right)\dot{I}_A = \dot{U}_\alpha + j\omega L_e \dot{I}_A \quad (24)$$

其中 $\dot{U}_\alpha = \frac{M\dot{U}_{CS}}{L_2 + L_B}$, $L_e = L_1 - \frac{M^2}{L_2 + L_B}$ 。因此故障电流控制器等效于电压源 \dot{U}_α 和电感 L_D 的串联,其中 L_D 为

$$L_D = L_e + L_C \quad (25)$$

根据式(22)和式(24), \dot{U}_α 与 \dot{U}_S 同相,因此改变 S_{K1} 的位置以控制 \dot{U}_α 的相位,使其与超前或滞后于故障相的电源电压同相。当 S_{K1} 在位置 2 时,则 \dot{U}_α 与 \dot{U}_{BB} 同相,它与滞后于故障相(A 相)的电源电压 \dot{U}_B 同相;当 S_{K1} 在位置 3 时,则 \dot{U}_α 与 \dot{U}_{CB} 同相,它与超前于故障相(A 相)的电源电压 \dot{U}_A 同相。

根据式(24)和式(25),调整 L_C 将改变 L_D ,但它对 \dot{U}_α 没有影响;调整 L_B 将改变 \dot{U}_α 的幅值而不会改变 \dot{U}_α 的相位,但该调节会改变 L_e 从而改变 L_D 。但是,如果在调整 L_B 的同时也调整 L_C ,且满足:

$$\Delta L_C = \frac{M^2}{L_2 + L_B + \Delta L_B} - \frac{M^2}{L_2 + L_B} \quad (26)$$

则在不改变 L_D 的情况下调节了 \dot{U}_α 的幅值。式(26)中, ΔL_B 为 L_B 的调节量,其目标是调节 \dot{U}_α 的幅值使其达到希望值; ΔL_C 为 L_C 的调节量,其调节目标是抵消因 L_B 的调节引起的 L_D 的变化。由此可知,协调控制 L_B 和 L_C 能独立控制 \dot{U}_α 的幅值和 L_D 。因此,图 2 所示的故障电流控制器等效于电压源与电感的串联,其电压源电压可以与超前或滞后于故障相的电源电压同相,同时串联电压源电压的幅值和串联电感的值可以独立调节。

为了有效地控制两相短路电流,在线路每相的两端均要装故障电流控制器。两相短路时,启动线路故障相两端的故障电流控制器,控制 S_{K1} 的位置,使位于发送端的故障电流控制器的等效电压源电压与超前于故障相的电源电压同相,位于接受端的故障电流控制器的等效电压源电压与滞后于故障相的

电源电压同相,在此基础上协调控制 L_B 和 L_C ,使其等效电压源电压的幅值和电感分别满足式(2)、式(5)、式(7)或式(9)、式(12)、式(14),则线路的短路电流为 0,线路电流也等于正常运行时的线路电流。因此,图 2 所示的故障电流控制器能控制两相短路故障电流为 0,并使故障线路上的电流等于正常运行时的线路电流。

处于备用状态时,故障电流控制器中的 S_{KS} 在闭合状态, S_{K1} 在位置 4,此时,故障电流控制器对线路的运行没有影响。

3 故障电流的控制策略

根据“两相短路故障电流的控制原理”,要准确控制故障电流控制器的状态以控制故障电流,就必须准确确定故障点的位置,但要准确确定故障点的位置比较困难,因此根据式(2)等确定短路情况下故障电流控制器的状态也比较困难。

根据式(4)或式(11),改变故障电流控制器的输出等效阻抗 X_L (或 X_{L1}) 将改变线路故障电流的幅值,它不会改变线路故障电流的相位;而调节 L_C 将只改变 L_D 从而改变 X_L (或 X_{L1}),它不会影响故障电流控制器的等效电压源电压,因此调节 L_C 将只改变故障电流的幅值而不会改变故障电流的相位。

图 3 为调节线路 S 端(S_1 端的情况相同)串联电压源电压幅值对线路电流影响的相量图。电压幅值为 $k'_s U_{AB}$ 时,根据式(4),B、C 相间的短路电流为 I' ;电压幅值调整为 $k''_s U_{AB}$ 时,B、C 相间的短路电流为 I'' 。根据图 3 和式(4),改变串联电压源电压的幅值将改变故障相间线电流的相位,但同时也将改变该电流的幅值。但是,如果在改变串联电压源电压幅值的同时也改变 L_C 的值从而改变串联等效电感 L_D 的值,而且

$$L''_D = \frac{\sqrt{k''_s{}^2 - k'_s{}^2 + 1}}{\sqrt{k'_s{}^2 - k'_s{}^2 + 1}}(kL + L'_D) - kL \quad (26)$$

则在不改变故障电流幅值的情况下实现了对故障电流相位的控制。式(26)中的 L'_D 、 L''_D 分别为调节前、后故障电流控制器的串联等效电感 L_D 的值。根据式(26)和故障电流控制器的工作原理,在有效调节范围内,调节 L_B 将改变串联电压源电压幅值从而改变故障电流的相位,但该调节也将改变故障电流的幅值,但是故障电流幅值的变化总可以通过调节 L_C 以调节其 L_D 给予补偿,因此通过协调控制 L_B 和 L_C ,可以在不影响故障电流幅值的情况下实现对故障电流相位的控制。因此,通过控制 L_B 和 L_C 能独立控制故障电流幅值和相位。

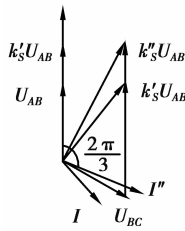


图 3 串联电压源电压幅值调整的相量图

基于上述特点,采用如下策略控制两相短路故障电流:根据线路状态控制 S_{SK} 的状态和 S_{K1} 的位置,在此基础上调节 L_B 以控制故障电流的相位,调节 L_C 以控制故障电流的幅值。图 4 为故障电流的控制原理图。

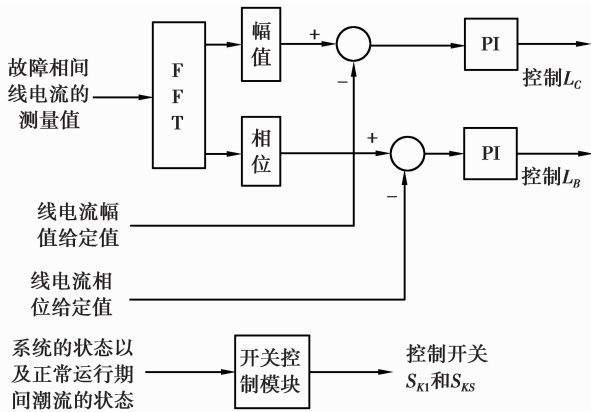


图 4 故障电流控制原理图

正常运行期间,“开关控制模块”控制 S_{KS} 在闭合状态, S_{K1} 在位置 4,故障电流控制器处于备用状态。两相短路后, S_{KS} 断开,启动故障相的故障电流控制器。如果故障电流控制器位于线路有功潮流的发送端,则控制 S_{K1} 的位置使其 \dot{U}_S 与超前于故障相的电源电压同相;如果位于接受端,则控制 S_{K1} 使 \dot{U}_S 与滞后于故障相的电源电压同相。例如,两相短路后,位于 B 相发送端的故障电流控制器则控制其 S_{K1} 在位置 1,使其 \dot{U}_S 与 A 相电源电压同相,而位于接受端的故障电流控制器则控制其 S_{K1} 在位置 3,使其 \dot{U}_S 与 C 相电源电压同相。同时测量故障相电流,计算故障相间的线电流,经 FFT(快速傅立叶计算)模块计算其幅值和相位,将该电流幅值与给定值比较,其差作为 PI 控制器的输入信号,该 PI 控制器的输出信号作为 L_C 电感控制器的给定信号;将故障相间线电流的相位值与给定值比较,其误差作为另一

个 PI 控制器的输入信号,该 PI 控制器的输出信号作为 L_B 电感控制器的给定信号。在其他相关文献中对可调电感控制器已有详细的描述,这里不再描述^[10-11]。在短路故障电流的控制过程中,位于线路同一端不同故障电流控制器的等效电压源电压的幅值是相等的,同时其输出的等效电感也是相等的,因此在调节过程中其 L_B 和 L_C 的电感值也是相等的。故图 4 中“控制 L_C ”和“控制 L_B ”将作为线路一端已经启动的所有故障电流控制器的可调电感 L_C 和 L_B 控制器的给定值。图 4 中“线电流幅值给定值”和“线电流相位给定值”分别为正常运行期间与之对应线电流的幅值和相位。

4 实验与仿真分析

4.1 实验分析

根据式(4)或式(11),对故障相间的线电压和线电流而言,两相短路故障等效于单相接地故障,而位于线路一端不同相的两个故障电流控制器也等效于 1 个电压源和 1 个电感的串联,因此它们也可以等效为 1 个故障电流控制器。因此实验中采用图 5 所示系统。

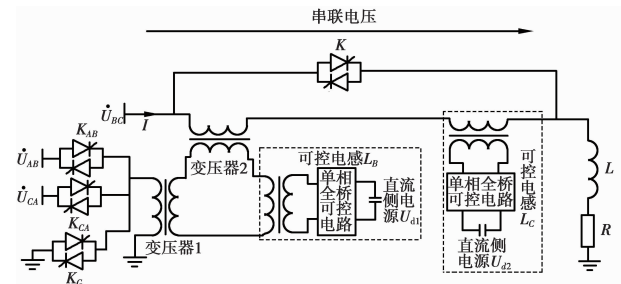


图 5 实验原理图

根据“两相短路故障电流的控制原理”,两相短路后,线路两端故障相间的线电流均等于正常电流时,则线路的故障电流为 0,因此故障电流控制器的一个目标就是控制线路两端故障相间的线电流等于正常运行时的电流。

根据图 1,正常运行期间线路 S 端和 S_1 端 B、C 相间的线电流 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{B1C1} 分别为

$$\begin{aligned} \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{B1C1}}{j\omega L}, \\ \dot{I}_{B1C1} &= \frac{\dot{U}_{B1C1} - \dot{U}_{BC}}{j\omega L}, \end{aligned} \quad (27)$$

其中 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{B1C1} 分别为线路 S 端和 S_1 端 B、C 相间的

线电压。正常运行期间, \dot{U}_{BC} 超前 \dot{U}_{B1C1} δ , 忽略其幅值差异, 则:

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{B1C1} e^{j\delta}. \quad (28)$$

因此正常运行期间, 线路 S 端和 S_1 端 B、C 相间的线电流 \dot{I}_{BC} 、 \dot{I}_{B1C1} 分别为

$$\dot{I}_{BC} = \frac{2 \sin \frac{\delta}{2} \times \dot{U}_{BC}}{\omega L} \times e^{-j\frac{\delta}{2}}, \quad (29)$$

$$\dot{I}_{B1C1} = \frac{2 \sin \frac{\delta}{2} \times \dot{U}_{B1C1}}{\omega L} \times e^{-j(\pi - \frac{\delta}{2})},$$

根据式(29), 正常运行时线路发送端 B、C 相间的线电流滞后 B、C 相间母线的线电压 $\delta/2$, 而接受端 B、C 相间的线电流滞后 B、C 相间母线的线电压为 $\pi - \delta/2$, 其他相间的线电流和线电压也有相同的关系。由于受系统运行稳定性的约束^[12], 正常运行期间线路的功率角小于 $\pi/3$, 而轻载时线路的功率角也在 $\pi/18$ 左右, 因此正常运行期间, 线路发送端的线电流滞后与之对应的母线线电压 $\pi/36 \sim \pi/6$, 而接受端的线电流则滞后与之对应母线线电压 $5\pi/6 \sim 35\pi/36$ 。

在图 5 所示的实验系统中, 开关 K 、 K_{AB} 、 K_{CA} 、 K_G 为由晶闸管构成的固态开关, \dot{U}_{BC} 表征了 B、C 相间电源的线电压, 其有效值为 250 V, 60 Hz; 电阻 R 和电感 L 模拟一端线路的故障相电路, 其中 R 为 1 Ω 、 L 为 20 mH。故障电流控制器由变压器 1、变压器 2、可控电感 L_B 、 L_C 构成, 变压器 1 是变比为 1:2.5 的升压变压器, 其原边绕组经开关 K_{AB} 、 K_{CA} 与电源 \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{CA} 相连, \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{CA} 为对称正序电源。变压器 2 的变比为 1:1, L_B 、 L_C 为负载可调节的可调电抗器^[13], 它们的调节范围分别为 1~10 mH 和 10~90 mH。由于实验仅模拟了经简化后的故障相线路, 不存在故障前线路的潮流状态, 因此其控制方案与图 4 所示的方案不完全相同, 但控制原理完全相同。控制系统如图 6 所示。

在图 6 中, “测量电流”和“测量电压”为图 5 中 \dot{I} 和 \dot{U}_{BC} 的测量值, 经 FFT 计算得到与之对应的幅值和相位; “电流幅值给定”为控制电流幅值的希望值, “电流相位给定”为控制电流滞后电源电压的希望值。故障电流控制器处于备用状态时, “启动信号”无效, 则“判断”模块输出的 G 将控制 K 和 K_G 导通, K_{AB} 和 K_{CA} 关断。故障电流控制器处于工作状态时, “启动信号”有效, 根据前面的分析, 正常运行期

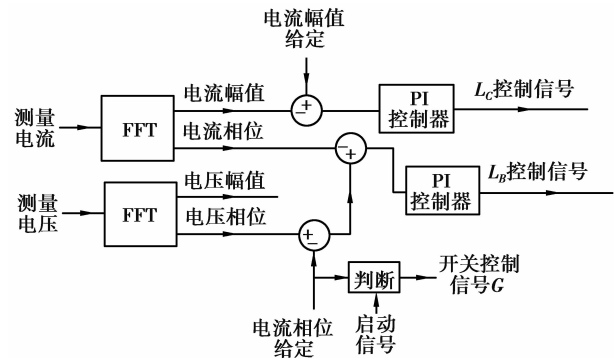


图 6 实验中采用的控制系统原理图

间, 线路发送端的电流滞后其电源电压 $\pi/36 \sim \pi/6$, 因此当“电流相位给定”在上述范围内时, 表明故障电流控制器处于线路发送端, G 信号将控制开关 K 、 K_G 、 K_{CA} 关断, K_{AB} 导通, 则变压器 1 的原边电压为 \dot{U}_{AB} , 它超前于故障相电源电压 $\dot{U}_{BC} 2\pi/3$; 当“电流相位给定”在 $5\pi/6 \sim 35\pi/36$ 区间时, 表明故障电流控制器位于接收端, G 将控制开关 K 、 K_G 、 K_{AB} 关断, K_{CA} 导通, 使变压器 1 的原边电压等于 \dot{U}_{CA} , 它滞后于故障相电源电压 $\dot{U}_{BC} 2\pi/3$ 。在图 6 中, “电流幅值给定”与实际电流幅值的误差控制电感 L_C ; 由于“电流相位给定”为控制电流滞后电源电压的希望值, 因此在图 6 中, 首先将电源电压相位减去“电流相位给定”, 其差与实际电流相位的误差作为控制电感 L_B 的依据。 L_B 、 L_C 的控制器采用文献[10]中的控制器。

图 7 为控制器投入前、后的实验波形, 故障电流控制器投入前, 线路电流的幅值 I 接近 50 A, 电流滞后电源电压约为 $4\pi/9$; 投入电流控制器将电流相位控制为滞后电源电压 $\pi/6$, 幅值控制为 25 A, 其实验结果如图 7 所示。保持电流幅值为 25 A, 将电流相位从滞后电源电压 $\pi/6$ 调节为滞后电源电压 $\pi/36$ 的实验结果如图 8 所示; 将电流从滞后电源电压 $\pi/36$ 调节为滞后电源电压 $5\pi/6$, 电流幅值保持 25 A 不变的实验结果如图 9 所示; 将电流相位从滞后电源电压 $5\pi/6$ 调节为滞后电源电压 $35\pi/36$, 电流幅值保持 25 A 不变的实验结果如图 10 所示; 保持电流相位滞后电源电压 $35\pi/36$, 电流幅值从 25 A 调整到 15 A 的实验结果如图 11 所示。根据图 7~11 的实验结果可知, 在保持电流幅值不变的情况下, 故障电流控制器能控制电流的相位, 使其等于正常运行时电流的相位; 同时能在保持电流相位不变的情

况下,控制电流的幅值。因此故障电流控制器能控制故障线路的电流使其等于正常运行时的电流。

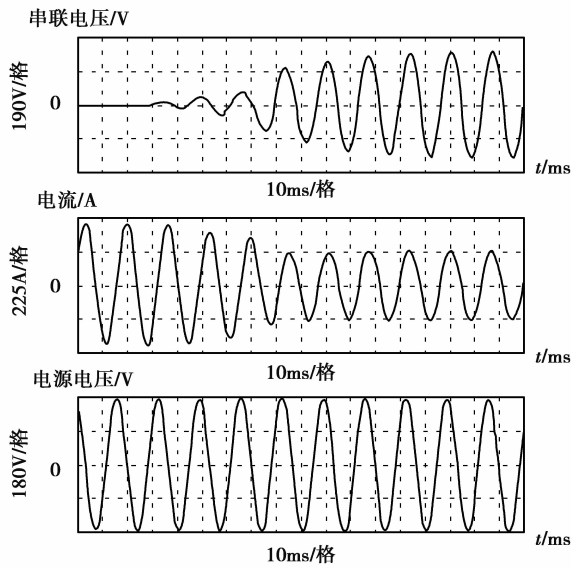


图 7 控制器投入后控制电流滞后电源电压 $\pi/6$ 、电流幅值 25A

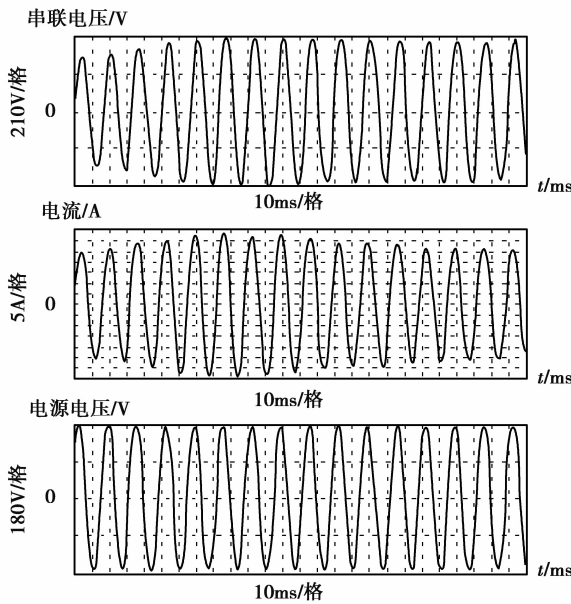


图 8 电流从滞后电源电压 $\pi/6$ 到滞后 $\pi/36$,幅值 25A 不变

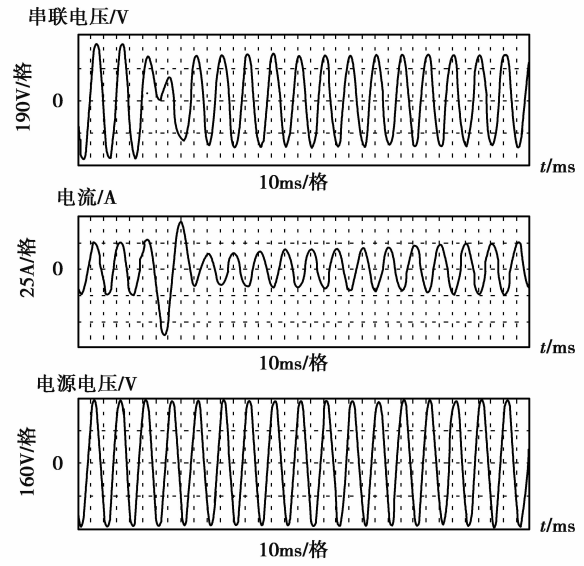


图 9 电流从滞后电源电压 $\pi/36$ 调整到滞后 $5\pi/6$,幅值保持 25A

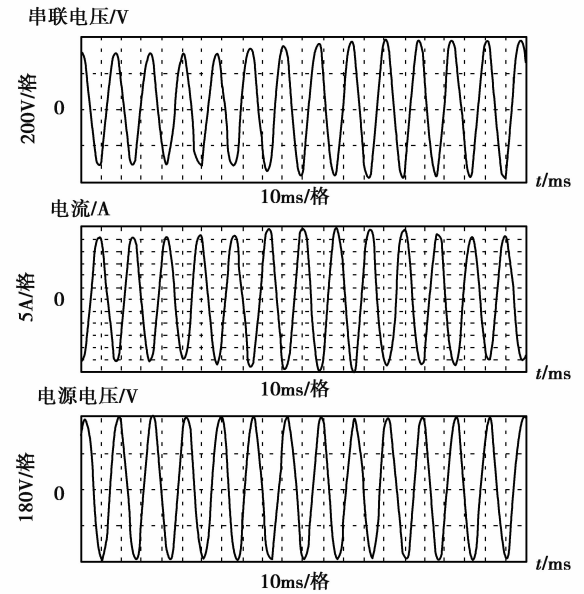
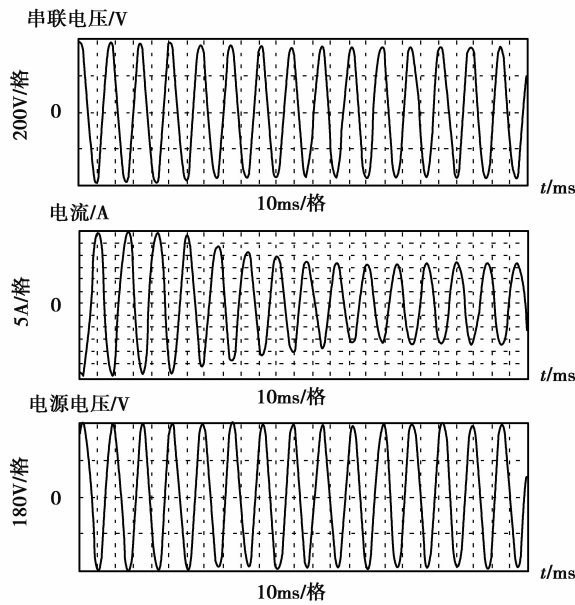


图 10 电流滞后电源电压从 $5\pi/6$ 调整到 $35\pi/36$,幅值 25A 不变

图 11 电流滞后电源电压 $35\pi/36$, 幅值从 25A 调整到 15A

4.2 仿真分析

为了分析故障电流控制器对两相短路故障电流的控制能力,在 SABER 仿真软件上建立了图 1 所示的简单电力系统模型,线路两端电源 \dot{U}_M 和 \dot{U}_{M1} 为对称三相电源,频率为 50 Hz,幅值为 179.6 kV, \dot{U}_M 超前 $\dot{U}_{M1} \pi/9$,该系统模拟了 220 kV 电压等级的线路; k 参数的值为 0.3。与图 1 不同的是,仿真中线路模型为电阻、电感的串联模型,其中每相线路的总电阻和电感分别为 10.14 Ω 和 0.252 H。故障电流控制器为图 2 所示模型,其中并联变压器 T_1 是变压比为 2.2 的升压变压器,串联变压器 T_2 的变压比为 1,可调电感采用文献[9]中的电感,其调节范围均为 0.1~1.5H;控制系统为图 4 所示模型。

在 1s 以前,线路工作为正常状态,此时 3 相线路电流对称,短路电流为 0,如图 12 所示;同时故障电流控制器向线路提供的等效电压(该电压为图 2 中 T_2 的原边电压与 L_C 的电压降之和,下同)为 0,如图 13 所示。大约在 1s 时,线路的 A、B 相在 F 点发生短路故障后,短路电流迅速增加,线路 S 端的 A、B 相电流均迅速增加,而 C 相电流基本不变,如图 12 所示,线路 S_1 端的电流也有相同的结果,由于篇幅原因,没有附上仿真结果;故障电流控制器投入后的仿真结果如图 13 所示(由于篇幅所限,仅附线路 A 相两端故障电流控制器输出的等效串联电压的仿真波形,而 B 相两端故障电流控制器输出的等

效电压具有相同的关系),在大约 1.2s 时,线路的故障电流为 0,线路 3 相的电流再次对称,且等于故障前的电流。

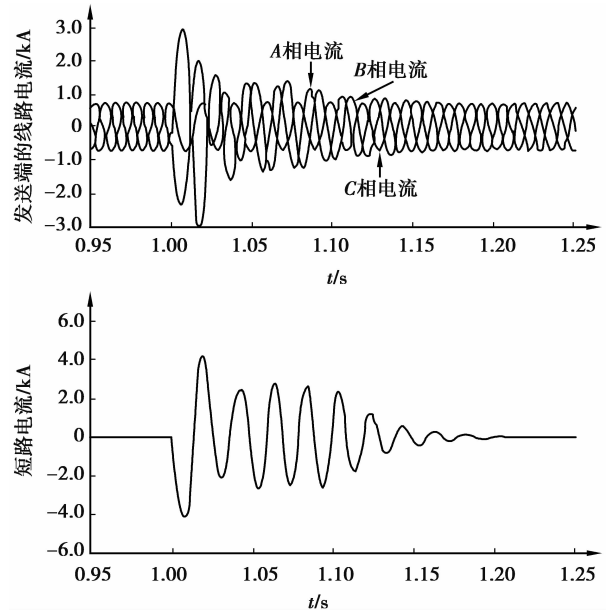


图 12 线路电流及短路电流

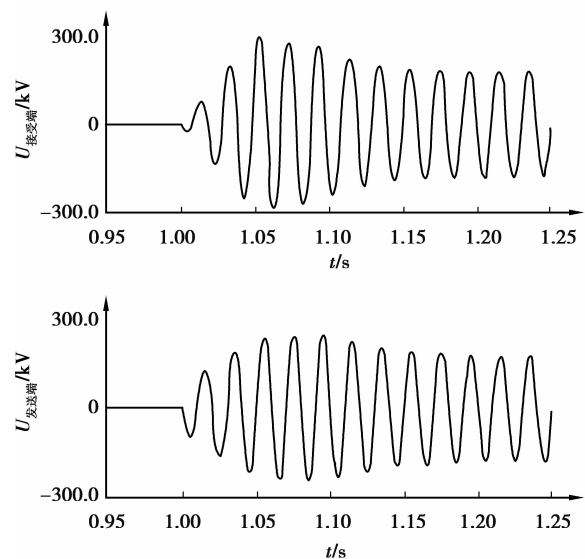


图 13 线路两端 A 相故障电流控制器的等效串联电压

5 结 语

笔者提出了新型的故障电流控制器以及与之对应的两相短路故障电流的控制策略和方法。故障电流控制器由变压器、可调电感 L_B 、 L_C 和开关元件构成,工作时它等效于电压源和电感的串联,控制开关的位置能改变串联电压源电压的相位,使其与超前或滞后于故障相的电源电压同相,并且能独立控制串联

电压源电压幅值和电感值。同时,在分析了线路串联电压的幅值和串联电感值与两相短路故障电流关系的基础上,提出了控制 L_C 以控制故障相间线电流的幅值,控制 L_B 以控制故障相间线电流相位的故障电流控制策略,在控制过程中保持线路一端不同故障电流控制器中对应电感的值相等,这样能有效地控制故障电流为 0,同时保持故障线路上的电流等于故障前的正常运行电流。实验证明了所提出的故障电流控制器能控制故障线路的电流,使其等于正常运行时的电流;仿真证明了所提出的故障电流控制器以及与之对应的控制原理和控制方法的正确性。

参考文献:

- [1] Lee B W, Sim J, Park K B, et al. Practical application issues of superconducting fault current limiters for electric power system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2): 620-623.
- [2] Liu H S, Zou L, Li Q M, et al. Operating characteristics of the permanent-magnet-biased saturation based fault current limiter [C]//Proceedings of High Voltage Engineering and Application, November 9-12, ICHVE 2008, Chongqing, China. Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 2008: 503-507.
- [3] Jin X F, Dai C B, Ji P, et al. Research of fault current limiter for 500kV power grid [C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 24-28, 2010, Hangzhou, China. Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 2010: 1-10.
- [4] Chen G, Jiang D Z, Lu Z Y, et al. Simulation study on a new solid state fault current limiter for high-voltage power systems [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004), April 5-8, 2004, Hong Kong, China. Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 2004, 1: 156-160.
- [5] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-4.
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. After the 2003 blackouts across several continentals [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-4.
- [6] 江渝, 刘和平, 冉立, 等. 连续调节消弧线圈接地系统单相接地故障谐振状态在线监测的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 35-40.
JIANG Yu, LIU Heping, RAN Li, et al. Study on the judgement of resonance state during the single-phase ground in the distribution with the continuously adjustable ASC [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 35-40.
- [7] 程路, 陈乔夫, 张宇, 等. 基于变压器可控负载原理的新型消弧线圈 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 77-81.
CHENG Lu, CHEN Qiaofu, ZHANG Yu, et al. Novel arc-suppression coil based on the theory of transformer with controllable load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 77-81.
- [8] 江渝, 冉立, 刘和平, 等. 可调节消弧线圈接地系统单相接地故障的辨识和选线 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 101-107.
JIANG Yu, RAN Li, LIU Heping, et al. Judgement of the grounding fault and fault line selection for resonant network with adjustable arc suppression coil [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 101-107.
- [9] Cheng L, Chen Q F, Zhang Y. Design principle of a novel automatic tuning arc suppression coil system [C]//Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008, October 17-20, 2008, Wuhan, China. Piscataway, N. J., USA: IEEE Press, 2008: 4483-4488.
- [10] 林泽科, 刘和平, 江渝, 等. 负载可调的变压器式电抗器控制系统的设计 [J]. 电力电子技术, 2010, 44(8): 71-74.
LIN Zeke, LIU Heping, JIANG Yu, et al. The design of control system for the reactor of transformer type with controllable load [J]. Power Electronics, 2010, 44(8): 71-74.
- [11] 江渝, 林泽科, 刘和平, 等. 变压器式可控电抗器在线状态的控制方案 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(1): 67-72.
JIANG Yu, LIN Zeke, LIU Heping, et al. A novel control method for controllable reactor of transformer type [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(1): 67-72.
- [12] 李光琦. 电力系统暂态分析 [M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [13] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 基于磁通可控的可调电抗器的新原理 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.
LI Dayi, CHEN Qiaofu, JIA Zhengchun, et al. A novel principle of adjustable reactor based on magnetic flux controllable [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 116-120.
- [14] Liu H P, Jiang Y, Ye Y L, et al. Efficient design of continuously adjustable reactors for distribution networks [J]. Electric Power Component and System, 2005(33): 525-537.