

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.018

基于FACTS技术无环流柔性倒闸装置研究

汪玉凤, 吕 飞

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 针对电力系统配电网中,当带负荷母线进行由分列运行方式转换至并列运行方式的倒闸操作时,会产生较大暂态冲击电流,严重威胁电网安全运行的这一问题,设计出一种基于FACTS(柔性交流输电)技术的新电力系统柔性倒闸装置,通过分析其工作原理,提出电力系统柔性倒闸装置的拓扑结构、建立其数学模型,并运用交叉解耦控制策略和锁相环控制,通过仿真和模拟现场环境样机试验,最终验证了该装置可安全、可靠地实现无环流倒闸操作。

关键词: FACTS技术; 电力系统柔性倒闸装置; 交叉解耦; 锁相控制

FACTS Based Flexible Switching Device Without Circulating Current

WANG Yufeng, LYU Fei

(Faculty of Electrical and Control Engineering Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China)

Abstract: In power distribution network, when separate operation mode is switched to parallel operation mode by the bus with load, great transient pulse current will be induced to seriously harm safe operation of the power grid. In this study, a new flexible switching device based on flexible AC transmission system (FACTS) technology is designed for power system. Its principle is analyzed, its topology is proposed, and its mathematical model is established. In this switching device, cross decoupling control strategy and phase-locked control are adopted. It is verified through simulation and field prototype experiment that this device can implement switching safely and reliably without circulating current.

Key words: FACTS technology; power system flexible switching device; cross decoupling; phase-locked control

0 引言

目前,煤矿井下通常采用双母线分列运行的供电方式,保证了煤矿供电的安全性和可靠性^[1]。但当需要对电源进线或变压器进行检修时,就要将母线的运行方式由分列运行方式变换至并列运行方式,即进行倒闸操作。这种变换母线运行方式的过程会在供电电源转换的线路中产生一定时间的停电。

传统的解决办法一般是改进合闸装置的材料和机械构造等,不能从根本上解决合闸的暂态过程对电网造成的冲击和干扰。现有的电力系统倒闸操作也属于刚性操作,即由于电力网是一个动态系

统,两条母线的电压值幅值、相角有差值,若带负荷直接进行倒闸操作会产生较大暂态冲击电流^[2],在系统中产生环流并回馈到电网中去,严重威胁电网的安全运行,有时甚至会使整个电网失稳崩溃,并造成大量经济损失。现在多数公司仍然使用老式的“操作票”方法进行倒闸操作。需要操作人员严格按照倒闸操作票规定顺序进行倒闸操作,存在着自动化、智能化程度低、由于操作员误操作易引起的安全隐患、引起电力网的短时间停电等问题,国内外学者也仅侧重于倒闸动作开关的结构、倒闸操作票的规范性以及避免无操作等方面的研究^[3-4],这些都属于刚性倒闸范畴。

文中提出一种基于 FACTS 技术^[5-6](柔性交流输

收稿日期:2015-06-21; 修回日期:2015-07-20

基金项目:国家自然科学基金(51307076);校市场调研基金资助项目(14-T-006,SCDY2013023)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307076), School Market Research Fund Project(14-T-006,SCDY2013023).

电技术)的新型电力系统柔性倒闸操作技术,为供配电系统母联切换提供了一种非刚性、平滑的倒闸操作方法、保证了母联开关不停电、零电位合闸,且具有时间短,不影响供电正常运行的特性,并有效提高了电力系统的稳定性和可靠性。

此装置的应用避免了繁琐的操作票倒闸操作,大大提高了倒闸操作的效率、降低了人工成本和时间成本,同时消除了由人员误操作带来的安全隐患和经济损失。由于电压等级为 6 kV 以下的两条电源进线电压矢量差不大,故装置容量小,经济。电力系统柔性倒闸装置可保证带载母线不断电合闸,并可以推广到整个电力系统任何倒闸操作中,当需要时可减少因停电带来的巨大经济损失和重大安全事故的发生,无环流合闸可防止整个电网失稳崩溃从而威胁电网安全运行。从长远考虑,其具备自身的经济合理性与可行性。

此外文中设计出电力系统柔性倒闸装置样机,采用交叉解耦控制策略和锁相环控制,建立数学模型,搭建样机进行模拟现场实验,验证了该装置可实现无环流倒闸操作以及其实用性和可靠性。此装置针对性的解决刚性倒闸的不足,将填补国内电力系统 FACTS 方面应用的空白。

1 电力系统柔性倒闸装置工作原理及其拓扑结构

1.1 电力系统柔性倒闸装置的工作原理

针对供电网分列母线带负荷倒闸操作会产生较大暂态冲击环流的这一现象,文中融合 FACTS 技术理论,首次提出柔性倒闸操作方法,设计出一种基于 FACTS 技术(柔性交流输电技术)的新型柔性倒闸装置。通过柔性倒闸装置实时跟踪和产生与两路母线电压差相反的电压相量,注入到母联开关两端,调节该电压降至零,再实施母联开关零电压合闸,实现了零电压无环流合闸操作。

该柔性倒闸装置工作原理为:设两母线电压相量为 $U_1=a\angle\theta$ 、 $U_2=b\angle 0^\circ$,倒闸装置需要的输出电压向量为 $U_3=c\angle\varphi$,且这三个向量满足图 1 所示的矢量关系。首先根据余弦定理变化式得出 U_3 幅值

$$c=\sqrt{a^2+b^2-2ab\cdot\cos\theta}。 \quad (1)$$

式(1)中: a 、 b 分别为 U_1 、 U_2 的幅值; θ 为其夹角。

其次由余弦定理(2)得出 U_3 的相角(3):

$$\cos(\pi-\varphi)=\frac{b^2+c^2-a^2}{2bc}; \quad (2)$$

$$\varphi=\pi-\arccos\left(\frac{b^2+c^2-a^2}{2bc}\right)。 \quad (3)$$

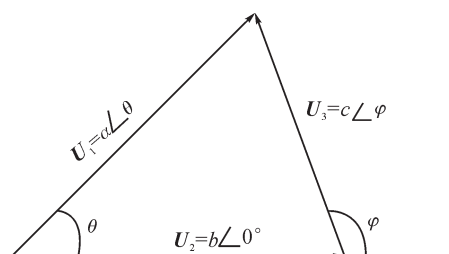


图 1 母线电压与柔性倒闸装置输出电压向量关系

Fig. 1 The vector relationship of bus voltage and flexible switching device output voltage

故器倒闸装置需输出的电压量 $U_3=c\angle\varphi$ 。这 3 个电压向量的表达式为

$$\begin{cases} U_1=a\cdot\sin(\omega t+\theta) \\ U_2=b\cdot\sin(\omega t) \\ U_3=c\cdot\sin(\omega t+\varphi) \end{cases}。 \quad (4)$$

以上为电力系统柔性倒闸装置基本工作原理,融合 FACTS 技术,采用交叉解耦控制策略和锁相环控制实现零电压无环流柔性倒闸操作。

1.2 电力系统柔性倒闸装置的拓扑结构

柔性倒闸装置把传统的刚性倒闸改为柔性操作,是一种让母联断路器平稳安全的合闸的控制装置,能够实现在两个独立的系统之间进行不停电、无环流合闸操作。将倒闸装置并入系统前,两系统彼此分开,没有任何联系;其投入系统之后,在注入点注入的一个电压,通过柔性倒闸装置实时跟踪和产生与两路母线电压差相反的电压相量,并入到母联开关两端,通过调节该电压并使之逐步降至零,将母联开关合闸,实现零电压无环流的倒闸操作。在此给出柔性倒闸系统拓扑框图见图 2。

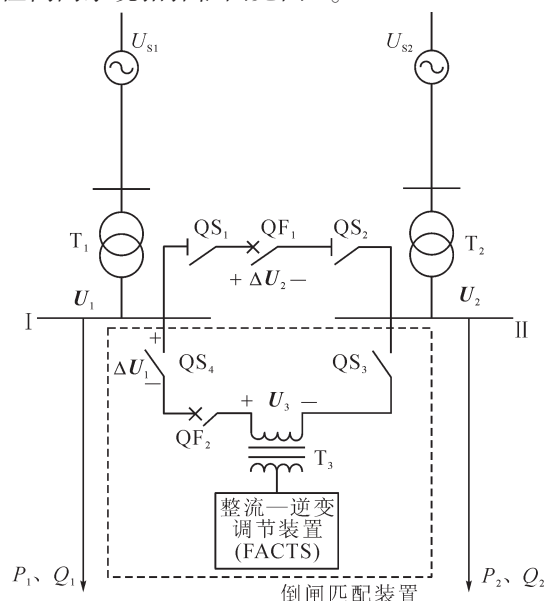


图 2 柔性倒闸系统拓扑结构图

Fig. 2 The topology structure of flexible switching system

图 2 中: U_{S1} 、 U_{S2} 分别为变电站两条进线电源电

压; T_1 、 T_2 是变压器; QF_1 是母联开关; QF_2 为柔性倒闸匹配装置投入和切除控制开关; U_1 和 U_2 为母线 I 电压相量和母线 II 电压相量, U_3 为母线倒闸装置输出的调整电压; ΔU_1 为两段母线的电位差, ΔU_2 为 QF_2 两端电压差,它们分别为 QF_1 和 QF_2 的动作控制量。其中,相量 U 、 U_1 和 U_2 满足图1关系。

通过检测装置检测两母线电压 U_1 和 U_2 ,倒闸控制器计算出 U_3 ,调节柔性倒闸匹配装置输出电压 U_3 与母联开关两端电压差 ΔU_1 相同,这时使得断路器 QF_2 两端电压 ΔU_2 为零,到达 QF_2 零电压合闸条件,断路器 QF_2 合闸,投入倒闸匹配器。然后逐渐调节减小 U_3 ,强迫两个变压器输出电流重新分配,通过柔性倒闸匹配装置的电流逐渐加大,当倒闸操作匹配器的输出电压 U_3 由初始电压逐渐调至零时,断路器 QF_1 两端电压 ΔU_1 为零,将其合上,此时线路中就不会产生暂态冲击电流,实现负荷潮流的控制,完成带负荷平滑的调节过程。

柔性倒闸装置是由直流侧电容、三相电压变换器、 LC 滤波器、串联耦合变压器等组成见图3。倒闸装置可产生幅值可调且与线路电流相垂直的同步三相电压,等同于在输电线路中串入一电抗,故可改变输电线路的有效阻抗,实现增加线路电流和传输功率的目的。

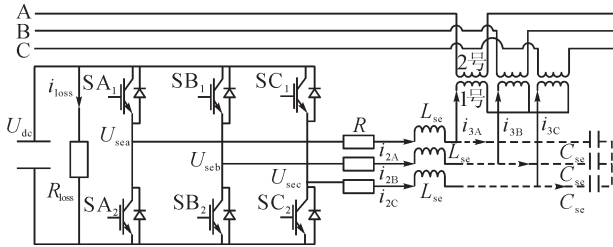


图3 柔性倒闸装置拓扑结构图

Fig. 3 The topology structure of flexible switching device

2 电力系统柔性倒闸装置的数学建模

如倒闸装置的系统图和结构图所示,对逆变器开关管进行开合操作,进而改变输出电压 U_{sc} 以及线路的阻抗参数。搭建柔性倒闸装置的数学模型: SA_1 、 SA_2 、 SB_1 、 SB_2 、 SC_1 、 SC_2 表示每相桥臂的开关管; L_{sc} 代表滤波电感; R_2 代表滤波电感内阻和由桥臂上下开关管互锁产生死区引起的电压损失; R_{loss} 代表变换器损耗; C_{sc} 代表输出滤波器电容; C_{dc} 代表直流侧电容。将系统看作三相对称,则有

$$\begin{cases} L_{sc} \frac{di_{seLx}}{dt} + R_2 i_{seLx} = -U_{12x} + S_x U_{dc} + U_{N0} \\ C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{seLA} S_A + i_{seLB} S_B + i_{seLC} S_C - i_{loss} \\ U_{N0} = -\frac{1}{3} U_{dc} (S_A + S_B + S_C) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: S_x 代表各桥臂开关管状态; x 分别代表A、B、C三相, $S_A=1$,代表A相上桥臂导通,下桥臂关断, $S_A=0$ 代表A相的上桥臂关断,下桥臂导通。 S_B 、 S_C 意义与 S_A 相似。

对式(5)进行 dq 同步旋转坐标变换,用 ω 代表 dq 坐标同步旋转的角速度,等于变换电压角速度; θ 代表同步旋转轴 d 初始时刻相对静止坐标轴ABC的位置,即决定了 d 轴取向。变换后为

$$\begin{cases} L_{sc} \frac{di_{seLd}}{dt} = -R_2 i_{seLd} + \omega L_{sc} i_{seLq} - u_{12d} + S_d U_{dc} \\ L_{sc} \frac{di_{seLq}}{dt} = -R_2 i_{seLq} - \omega L_{sc} i_{seLd} - u_{12q} + S_q U_{dc} \end{cases}; \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_{sc} \frac{du_{12d}}{dt} = \omega C_{sc} u_{12q} + i_{seLd} - i_{sed} \\ C_{sc} \frac{du_{12q}}{dt} = -\omega C_{sc} u_{12d} + i_{seLq} - i_{seq} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: i_{seLd} 、 i_{seLq} 为串联变换器输出电流在 dq 坐标下的分量; i_{sed} 、 i_{seq} 为串联变压器副边电流在 dq 坐标下的分量; u_{12q} 、 u_{12d} 为倒闸装置串联变压器副边电压在 dq 坐标下的分量; S_d 、 S_q 为开关函数 S_i 在 dq 坐标下的分量; U_{dc} 为直流侧电容电压。

柔性倒闸装置数学模型见图4,在 dq 坐标系下倒闸装置数学模型的 dq 轴之间存在耦合关系, d 、 q 两轴电流、电压的改变彼此作用。

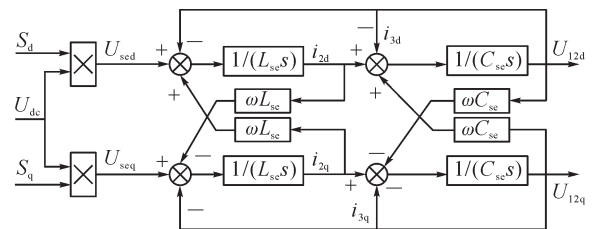


图4 柔性倒闸装置的数学模型

Fig. 4 Flexible switching device mathematical model

3 电力系统柔性倒闸装置的控制策略和锁相环控制

3.1 电力系统柔性倒闸装置控制策略

由于变换器中感性元件关系,变量 i_{2d} 、 i_{2q} 在 d 、 q 轴之间存在耦合,直接对经过同步旋转坐标变换后的两相直流信号进行PI调节,不能实现准确跟踪,需对数学模型进行解耦。

柔性倒闸装置在恒阻抗模式下,调节输出电压 d 、 q 轴分量可改变电流,实现对供电系统的潮流控制。倒闸控制器分为 d 、 q 轴内部电流和外部电压的闭环控制结构,采用交叉解耦的控制策略分别消除 d 、 q 分量间的耦合。其简化后的数学模型为

$$L_{se} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 \\ 0 & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -U_{ssd} + S_d U_{dc} + \omega L i_q \\ -U_{ssq} + S_q U_{dc} - \omega L i_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

设 $U_{ld}=S_d U_{dc}$, $U_{lq}=S_q U_{dc}$, 对式(8)拉氏变换后得电流控制图, 见图 5。

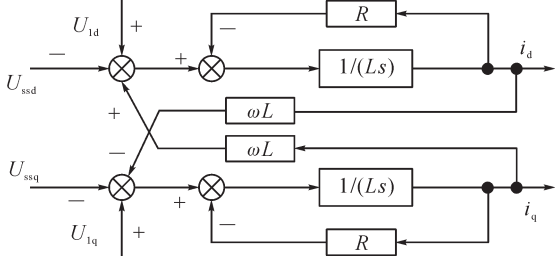


图 5 柔性倒闸装置电流控制框图

Fig. 5 Current control structure diagram for flexible switching device

i_d, i_q 受到闸装置注入电网电压 U_{ssdq} 、直流侧电压 U_{dc} 和电感产生耦合量的影响, 对式(8)进行交叉解耦, 引入中间变量 u_d, u_q , 设

$$\begin{cases} U_d = -U_{ssd} + U_{ld} + \omega L_{se} i_{lq} \\ U_q = -U_{ssq} + U_{lq} - \omega L_{se} i_{ld} \end{cases} \quad (9)$$

从而, 得

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = L_{se} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)中, 电压变量 u_d, u_q 与电流变量 i_d, i_q 之间已无动态耦合因素。对输入电流 i_d, i_q 与输出电压 u_d, u_q 进行 PI 调节, 可抑制耦合电流, 其参考值为

$$\begin{cases} U_d^* = k_{pi}(i_d^* - i_d) + k_{il} \int (i_d^* - i_d) dt \\ U_q^* = k_{pi}(i_q^* - i_q) + k_{il} \int (i_q^* - i_q) dt \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, k_{pi}, k_{il} 为电流控制比例积分增益; i_d^*, i_q^* 为 d, q 两轴的参考电流信号, d, q 轴两个量的控制通道彼此独立, 电流的控制使用电流环 PI 调节器优化变换器阻尼特性、减小系统振幅和电流环输出的静态误差。由电压环控制器输出得到变换器输出电流参考量 i_{ld}^*, i_{lq}^* , 与实际电流 i_{ld}, i_{lq} 比较后, 通过电流内环 PI 调节器来控制逆变器输出电压 U_{ld}, U_{lq} , 最终得到变换器调制比 M 和控制相角 α 。

$$\begin{cases} M = \frac{\sqrt{U_{ld}^2 + U_{lq}^2}}{U_{dc}} \\ \alpha = \arctan\left(\frac{U_{lq}}{U_{ld}}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, 相角 α 为需控制的偏移角, 单极性倍频调制下 A 相的正弦调制信号相位为 $\theta = \theta_i - \arctan(U_{lq}/U_{ld}) - \text{sign}(X_{ref}) \times \pi/2$ 。

3.2 电力系统柔性倒闸装置的锁相环控制

在供电倒闸系统中, 利用交叉解耦控制提供与

电网同步的正余弦信号, 故锁相技术^[7]是该系统实现对电网电压相位准确跟踪的重要前提、保证。

该装置应用一种具有鲁棒性的单相数字锁相环, 其检测精度高且检测结果不受电压畸变的影响, 对电网有良好适应性。具体原理为

$$u_a(t) = \sin(\omega_0 t + \theta_0) + \varepsilon_0 \quad (13)$$

式(13)中: ω_0 为电网 A 相电压角频率; θ_0 为电网 A 相电压相位; ε_0 为电网谐波和检测误差成分。

设反馈回的锁相环跟踪电压信号为

$$u_f(t) = \cos(\omega_1 t + \theta_1) \quad (14)$$

式(14)中: ω_1 为跟踪信号角频率; θ_1 为跟踪信号相位。

当锁相环测得频率与电网频率相同时, 即 $\omega_0 = \omega_1$, 将式(13)、(14)两式相乘即得到简化式(15)。

$$\Delta u(t) = \frac{1}{2} \sin(2\omega_0 t + \theta_0 - \theta_1) + \frac{1}{2} \sin(\theta_0 - \theta_1) + \varepsilon_0 \cos(\omega_0 t + \theta_1) \quad (15)$$

式(15)中 3 个分量分别是 100 Hz 的正弦波动分量、直流分量、高频谐波引起的干扰。另加一低通滤波器滤除二次分量和噪声, 此时

$$\overline{\Delta u(t)} = \frac{1}{2} \sin(\theta_0 - \theta_1) \quad (16)$$

如此基于闭环反馈通过 PI 无静差调节即可实现电压相位的锁定。锁相环的调节过程如下: 输入信号与反馈信号经过乘法鉴相器进行相位比较, 产生对应两信号相位差的误差电压 Δu , 再经环路低通滤波器 LPF 滤掉二次谐波分量, 得直流分量 $\overline{\Delta u}$, 确保环路控制系统的稳定性, 由 PI 控制器实现直流无静差调节, 再由积分环节以及对 2π 进行求余完成角频率到相角的转换。当系统达到稳定, $\overline{\Delta u}$ 为零, ω 保持不变, 锁相环检测到的相位与电网电压相位相等, 完成相位锁定。

将文中提出的鲁棒性基于 MATLAB 分析, 仿真结果见图 6(图 6 中给出系统的三相电压波形, 但此算法只需检测 A 相电压, 便于分析)。情况 1: 三相电网电压在 0.04~0.08 s 内发生电压暂降, 电压幅值由 10 V 降到 8 V, 检测结果见图 6(a), 锁相准确; 情况 2: 三相电网电压在 0.04~0.08 s 内发生三相不平衡, 幅值依次为 10、8、6 V, 检测结果见图 6(b), 锁相准确; 情况 3: 三相电网电压在 0.04~0.08 s 内注入五、七次谐波, 检测结果见图 6(c), 锁相准确。因此, 该锁相环具有良好的鲁棒性, 对电网具有良好的适应性。

4 仿真与实验

4.1 仿真验证

为验证所提出方案的正确性, 对基于 MATLAB

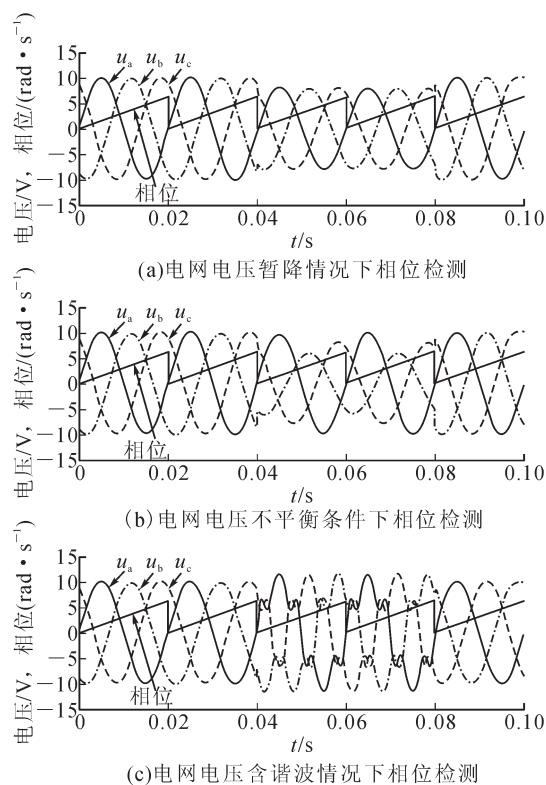


图6 非理想条件下PLL相位检测

Fig. 6 Phase detection by PLL under non-ideal conditions

/Simulink 所建立的三相 6 kV 柔性倒闸装置系统仿真模型进行研究。1 号母线电压向量为 $5\ 920 \angle 215\ 652^\circ$, 2 号母线电压向量为 $6\ 008 \angle 559\ 442^\circ$, 直流侧电压取 $U=4\ 000\ \text{V}$, 滤波电感 $L=11.7\ \text{mH}$, 逆变器等效电阻和输出线路损耗 $R=0.05\ \Omega$ 。三相输出的耦合变压器采用 3 个参数相同的变压器, 一次侧串联接入系统, 二次侧接成角形, 变压器容量为 25 000 kVA, 变比, 一、二次侧的额定电压均为 8 000 kV。

柔性倒闸装置系统仿真见图 7。0.2 s 时刻将倒闸装置投入系统, 母联开关两侧电压经过几个周期后实现同步。其波形见图 7(a), U_1 、 U_2 为分列运行的两条母线的电压。倒闸装置在投入系统后输出的电压波形见图 7(b), 峰值达到 352 V, 然后逐渐变小。仿真波形基本符合预期, 与理论分析结果一致, 验证了其可行性。

4.2 实验验证

倒闸装置的主电路拓扑采用大功率 IGBT 模块, 三相桥式结构, 并通过电源发生器来产生三相对称的系统电压约为 62 V, 直流侧电容为 2 200 μF 电解电容, 实验过程中, 为了防止倒闸过程中产生大电流, 在电路中穿入大功率电阻。控制系统为基于 DSPF28335 的倒闸装置控制器, 主要用来实现电压、电流检测与控制算法, 产生脉冲触发信号等功

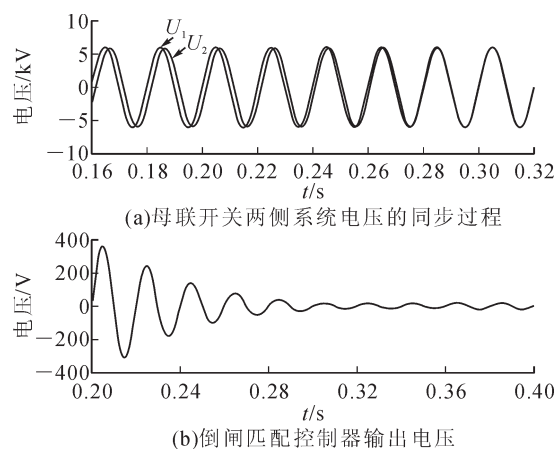


图7 柔性倒闸装置系统仿真图

Fig. 7 Systematic simulation of flexible switching device

能。图 8 为实验室样机图。图 9 为模拟实验环境中, 倒闸装置输出的电压波形, 其峰值达到 4.1 V, 经过 5 个周期后逐渐减小至 0.4 V 左右。现场实验已验证了此方法的有效性和可行性。



图8 柔性倒闸装置实验样机

Fig. 8 Flexible switching device experimental model

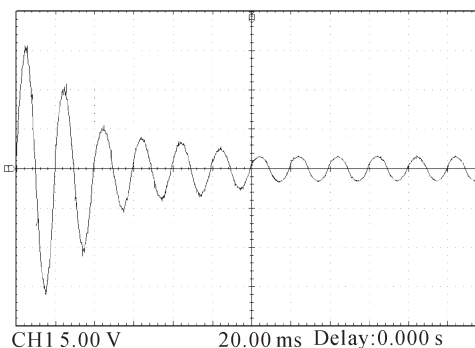


图9 柔性倒闸装置实验电压波形图

Fig. 9 Flexible switching device experimental voltage

5 结语

文中提出了一种新的提出一种基于 FACTS (柔

性交流输电)技术的新型柔性倒闸装置,通过分析其工作原理,设计出其拓扑结构、建立数学模型,并最终通过仿真验证了柔性倒闸装置的可行性,表明了其能够实现供配电系统非刚性、平滑的无环流倒闸操作,且具有操作时间短,不影响供电正常运行,提高电力系统的稳定性和可靠性的优良特性和较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 陶学仪,尚药世. 现代化矿井安全高效综采工作面供电技术[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1930-1934.
TAO Xueyi,SHANG Yaoshi. Power supply technology of safety and high efficiency fully-mechanized coal mining technology working face of modernized mine[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(11):1930-1934.
 - [2] 王彦文,赵铁英. 变压器有载分闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J]. 煤炭学报,2013,38(7):2-5.
WANG Yanwen,ZHAO Tiejing. Research on coalmine power grid short-circuit transient process with inductive type fault current limiter[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(7):2-5.
 - [3] 郭创新,朱传柏,曹一家,等. 基于多智能体的全面防误策略及智能操作票生成系统[J]. 电网技术,2006,30(4):50-54.
GUO Chuangxin,ZHU Chuanbai,CAO Yijia,et al. An overall anti-maloperation strategy based on multi-agent system and implementation of intelligent switching order generation system[J]. Power System Technology,2006,30(4):50-54.
 - [4] 刘强,周明,李庚银,等. 具有计算分析功能的电网调度操作票系统[J]. 电网技术,2005,29(7):68-73.
LIU Qiang,ZHOU Ming,LI Gengyin,et al. Power system dispatching order generating system with calculation and analysis functions[J]. Power System Technology,2005,29(7):68-73.
 - [5] 上官海洋,向铁元,张巍,等. 基于智能优化算法的 FACTS 设备多目标优化配置[J]. 电网技术,2014,38(8):2193-2199.
SHANGGUAN Haiyang,XIANG Tiejuan,ZHANG Wei,et al. Intelligent optimization algorithm based multi-objective optimal configuration for FACTS equipments [J]. Power System Technology,2014,38(8):2193-2199.
 - [6] CHANG Y C. Multi-objective optimal SVC installation for power system loading margin improvement[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(2):984-992.
 - [7] 王鹿军,张冲,吕征宇. 电网谐波背景下单相并网逆变器的锁相方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):107-112.
WANG Lujun,ZHANG Chong,LYU Zhengyu. Phase-locked loop for single phase grid-connected inverter sinaharmonic distorted grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(14):107-112.
- 汪玉凤(1962—),女,教授,研究方向为电网电能质量调节与控制、电力系统调度自动化等。
-
- (上接第 105 页)
- 34(4):35-39.
LI Zhiyuan,HUANG Guoxing,HUANG Ying,et al. Test and characteristic study on audible noise of filter capacitor at converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2013,34(4):35-39.
 - [10] RAUSCH M,KALTENBACHER M,LANDES H,et al. Combination of finite and boundary element methods in investigation and prediction of load-controlled noise of power transformers[J]. Journal of Sound and Vibration,2002,250(2):323-338.
 - [11] GB 12348—2008 工业企业厂界环境噪声排放标准[S]. 2008.
GB 12348—2008 Emission standards for industrial enterprises noise at boundary[S].2008.
 - [12] GB/T 1094.10—2003 电力变压器 第 10 部分:声级测定[S].2003.
GB/T 1094.10—2003 Power transformer. Part tenth: Determination of sound levels[S].2003.
 - [13] 范亚洲,汤振鹏,陈澜,等. 500 kV 顺江乙线老化线路可听噪声与无线电干扰特性研究[J]. 高压电器,2013,49(2):13-18.
FAN Yazhou,TANG Zhenpeng,CHEN Lan,et al. Research on audible noise and radio interference characteristics of aged 500 kV Shunde-Jiangmen transmission line[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(2):13-18.
 - [14] 莫娟,苏俊收,刘吉轩,等. 大型电力变压器油箱辐射噪声预估研究[J]. 高压电器,2014,50(4):12-16.
MO Juan,SU Junshou,LIU Jixuan,et al. Radiated noise prediction for large power transformer tank[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(4):12-16.
 - [15] 莫娟,刘吉轩,苏俊收,等. 大型电力变压器的噪声预估研究[J]. 高压电器,2014,50(6):32-37.
MO Juan,LIU Jixuan,SU Junshou,et al. Noise prediction of large power transformer tank[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(6):32-37.
- 裴春明(1974—),男,博士,高工,主要从事电力系统电磁环境和噪声治理研究。