

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190267

一种柔性倒闸调节器的控制方法

张国军¹, 王鹏¹, 于双立², 张鹤馨¹, 徐磊³

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 国网天津滨海供电公司, 天津 300450;
3. 国网秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 针对电力系统中操作复杂、效率低下和存在安全隐患等倒闸操作问题, 设计出一种带负荷的电力系统柔性倒闸调节器。该装置主要是调节两个独立分列运行的配电母线电压, 使两母线间产生逐渐变化的潮流, 最终实现两母线电压趋向相等实现并列运行。设计了柔性倒闸装置的数学模型及拓扑结构, 运用 $abc-dq$ 变换进行前馈解耦的电流内环控制和 PI 调节的电压外环控制。通过 Matlab/Simulink 仿真验证了控制策略的快速性及准确性, 能够保证用户用电可靠性及提高倒闸操作效率。

关键词: PI; 前馈解耦; 双闭环调节; 锁相; 柔性倒闸

A control method of flexible switching regulator

ZHANG Guojun¹, WANG Peng¹, YU Shuangli², ZHANG Hexin¹, XU Lei³

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. State Grid Tianjin Binhai Power Supply Company, Tianjin 300450, China;
3. State Grid Qinhuangdao Power Supply Company, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Addressing the switching operation problems of complex operation, low efficiency, and potential safety hazards in a power system, a flexible power system switching regulator with load is designed. This device mainly adjusts the voltage of two independent buses for power distribution, so that a gradually changing current is generated between the two buses. Over time, the voltage values of the two buses tend to be equal to achieve parallel operation. The mathematical model and topology of the flexible switching device are designed. The $abc-dq$ transformation is used to control the current inner loop control of feedforward decoupling and the voltage outer loop control of PI regulation. The rapidity and accuracy of the control strategy are verified by Matlab/Simulink simulation. This strategy can ensure the reliability for users and improve switching operation efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51974151) and Guiding Program of Liaoning Natural Science Foundation (No. 201805500438).

Key words: PI; feedforward decoupling; double closed-loop regulation; phase lock; flexible switching

0 引言

在电力系统运行的过程中, 供电线路的改变、变压器的检修以及分、并列运行的变换都要进行电气设备运行方式和状态的改变^[1]。这种运行方式的改变可能会造成大面积的停电状况, 给用户带来严重的经济损失^[2-5]。

目前, 对于分列运行的供电系统其倒闸操作分

为两种: 1) 第一种为刚性倒闸, 两条分列运行母线的电压幅值、相角有较大差值。这种倒闸方式会在合闸瞬间产生强大的冲击电流并回馈到电网中^[6], 严重的时候会导致供电系统继电保护装置的動作, 甚至是烧毁变压器^[7]。2) 第二种为传统操作票倒闸, 传统操作票倒闸操作工序繁琐, 操作复杂, 一般需要长达4个小时的操作时间, 在此期间相关母线下的负荷必须停电, 对供电系统的安全运行带来了严重的影响^[8-10]。文献[11]提出使用柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)的相关技术。文献[12]提出了一种可以实现

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51974151); 辽宁省自然科学基金指导计划项目资助(201805500438)

系统潮流平稳变化的新型电力系统的柔性倒闸操作装置。此装置可以在不断电的情况下短时间内完成倒闸操作，提高电力系统倒闸操作的稳定性、安全性和高效性，但并没有给出如何调节母线间电流及电压的控制策略。

以电压等级为 6 kV 的母线侧电压为研究对象来设计电力系统柔性倒闸装置及控制策略。此装置可以带负荷使用，并能根据母线电压差来调节母线间短路冲击电流在安全范围。避免了传统倒闸操作的繁琐过程，很大程度上提高了倒闸操作的效率，大大缩短了倒闸操作的时间，降低了人工成本，同时有效消除了传统倒闸操作所带来的安全隐患。以 6 kV 电压等级为基础，此装置可以推广到电力系统任何电压等级的倒闸，可以减少电力系统经济损失，避免重大的安全事故，无环流合闸可以使得电网稳定运行，防止电网失稳崩溃而威胁电力系统的安全运行。此外利用 Simulink 建立柔性倒闸调节器的仿真模型，通过前馈解耦的控制策略和锁相对柔性倒闸调节装置的工作过程进行仿真，验证了该装置可进行无环流合闸操作及其安全可靠。

1 柔性倒闸调节的原理

1.1 柔性倒闸调节的工作原理

通过电力网中分列运行的供电母线来实现其柔性倒闸操作，以静止同步串联补偿器(Static Synchronous Series Compensator, SSSC)的基本原理为基础^[13-16]，实现供电系统分列运行的柔性倒闸调节。但与 SSSC 不同的是，本文设计的柔性倒闸调节装置不是通过在线路上补偿阻抗来调节其有功功率，而是在其倒闸点投入倒闸装置，让其输出一个与两母线端电压差相等的补偿电压，最终实现零电压向量的合闸操作。倒闸调节装置的应用方式如图 1 所示。

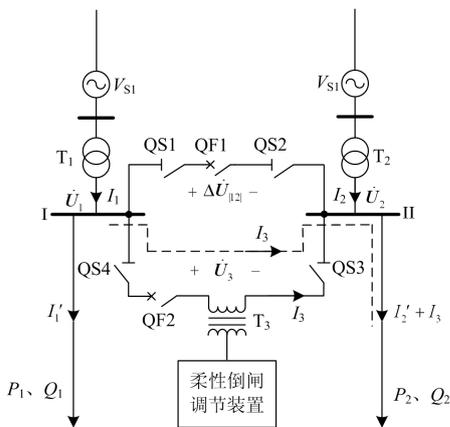


图 1 柔性倒闸调节装置的应用

Fig. 1 Application of flexible switching regulator

倒闸调节装置经过变压器 T_3 接入到供电系统母线的二次侧，断路器 QF2、隔离开关 QS3、QS4 串联后与断路器 QF1、隔离开关 QS1、QS2 并联，其中 I_1 为 T_1 二次侧电流、 I_2 为 T_2 二次侧电流、 I_3 为倒闸调节装置投入后产生的电流。倒闸调节装置投入到供电系统之前，首先要检测出分列运行供电系统二次侧母线电压向量 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 ，计算出两母线的电压差 $\Delta\dot{U}_{|12|}$ 。

$$\Delta\dot{U}_{|12|} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 \quad (1)$$

控制倒闸调节装置输出电压向量 \dot{U}_3 与检测得到的供电系统电压向量差 $\Delta\dot{U}_{|12|}$ 相等，此时断路器 QF2 一端电压为零，合上断路器 QF2 使倒闸调节装置投入供电系统中。通过调节柔性倒闸装置使输出电压 \dot{U}_3 减小即可完成倒闸。当倒闸调节装置减小输出电压 \dot{U}_3 后， T_3 所在支路由于两母线电压向量差会产生电流 I_3 ，假设 $\dot{U}_1 > \dot{U}_2$ ，则经过 T_3 的电流由母线 I 流向母线 II 的负荷回路，如图 1 虚线所示，由于负荷在一瞬间的电流不变，为 $I'_2 + I_3$ (其中 I'_2 为倒闸调节器投入后产生的电流)，所以母线 II 为负荷提供的电流减小，电压向量 \dot{U}_2 幅值增大，从而使得 $\Delta\dot{U}_{|12|}$ 幅值减小，如图 2 所示。当 $\Delta\dot{U}_{|12|}$ 幅值减小至与 \dot{U}_3 相等且 I_3 的模不变时，再次减小倒闸调节器的输出电压使新的 I_3 产生。这时倒闸调节装置输出电压逐渐减小，两母线存在一个安全范围内的电压差，致使电力系统潮流重新分布。同时，倒闸调节装置输出电压实时跟踪两母线电压差，并逐步减小。随着倒闸调节器输出电压 \dot{U}_3 的改变，两母线电压向量 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 逐渐接近，直至两者相互重合，此时的 $\Delta\dot{U}_{|12|} = 0$ ，QF1 两端电压差为 0，可以直接合闸，最终实现倒闸操作。

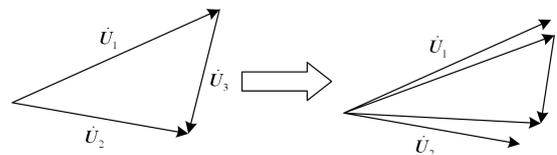


图 2 柔性倒闸装置调节过程

Fig. 2 Adjustment process of flexible switching device

1.2 柔性倒闸装置输出电压的确定

在柔性倒闸装置投入到供电系统之前，首先要确定倒闸装置输出电压的幅值及相角。设供电母线 I、II 的电压向量为 $\dot{U}_1 = U_1 \angle \varphi$ 、 $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$ 、

$\dot{U}_3 = U_3 \angle \theta$, 则柔性倒闸装置的输出电压 \dot{U}_3 与 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 的关系如图 3 所示。

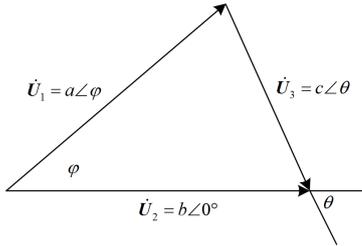


图 3 倒闸装置输出电压与母线电压的关系

Fig. 3 Relationship between output voltage and bus voltage

由于这三个向量满足余弦定理, 可以根据余弦定理计算出输出电压的幅值:

$$U_3 = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \varphi} \quad (2)$$

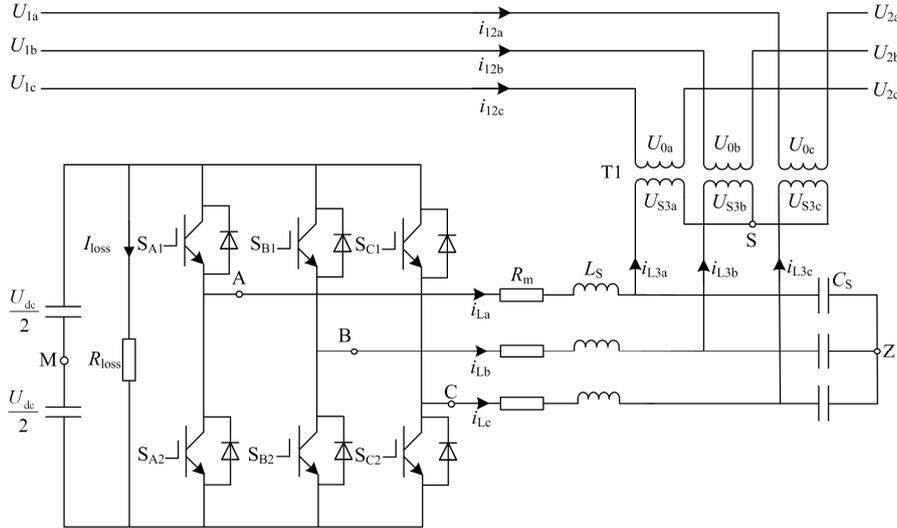


图 4 柔性倒闸装置拓扑图

Fig. 4 Topology diagram of flexible switching device

这种结构可以有效地将系统进行电气隔离, 防止高压端电路对前端电路的影响, 在具有升降压功能的同时还可以滤除高次谐波分量, 大大提高了倒闸调节器输出电压的利用率。倒闸调节器以改变输出电压的方式, 使耦合逆变器二次侧的电压发生变化, 进而实现柔性倒闸操作。

2.2 柔性倒闸装置的数学模型

在图4所示的系统中, U_{dc} 为直流储能元件的输出电压, R_{loss} 等效于变压器各项损耗之和, R_m 的电压等效于开关管上下桥臂互锁产生的死区电压, L_s 表示滤波电感, C_s 表示倒闸调节器输出滤波电容。为了便于表征各相上下桥臂开关管 S_{A1} 、 S_{A2} 、 S_{B1} 、 \dots 、 S_{C2} 的开通状态, 可将开关函数定义为 $S_{ij} = 1$ 表示开关管 S_{ij} 闭合 ($i = A, B, C$ $j = 1, 2$),

则输出电压的相角为

$$\theta = \arccos\left(\frac{U_2^2 + U_3^2 - U_1^2}{2U_2U_3}\right) \quad (3)$$

由此可以通过采集母线 I、II 的电压向量来计算柔性倒闸装置输出电压的幅值及相角。

2 柔性倒闸装置的拓扑及数学建模

2.1 柔性倒闸装置的拓扑结构

柔性倒闸装置主要是输出一个与两母线电压向量差相等的电压向量, 其主体结构是将三相逆变电路与串联耦合变压器结合, 通过对各桥臂开关管通断的控制以实现输出电压与设定电压相等。倒闸调节器的拓扑结构如图 4 所示。

$S_{ij} = 0$ 表示开关管断开。定义 U_{iM} ($i = A, B, C$) 为图 4 中 A、B、C 各点与点 M 之间的电压, U_{iS} ($i = A, B, C$) 为图 4 中 A、B、C 各点与点 S 之间的电压, U_{SM} 为图 4 中 S 点与 M 点间的电压, 以 C 相为例, 则存在:

$$U_{CM} = \frac{U_{dc}}{2} (S_{C1} - S_{C2}) \quad (4)$$

为了避免直流侧短接和负载悬空状况的发生, 需要规定全桥逆变电路每一条桥臂上的开关管不能同时打开与关闭, 即存在 $S_{C1} + S_{C2} = 1$, 则式(4)可改写为

$$U_{CM} = \frac{U_{dc}}{2} (2S_{C1} - 1) \quad (5)$$

根据基尔霍夫电压定律, 存在:

$$U_{SA} + U_{SB} + U_{SC} + U_{AM} + U_{BM} + U_{CM} = 3U_{SM} \quad (6)$$

当逆变电路输出为对称三相电压时, S 与 Z 同电位并且 $U_{SA} + U_{SB} + U_{SC} = 0$, 可求得:

$$U_{SM} = \frac{U_{dc}}{6}(2S_{A1} + 2S_{B1} + 2S_{C1} - 3) \quad (7)$$

进一步可以求得:

$$U_{CS} = \frac{U_{dc}}{2}\left(\frac{2}{3}U_{CM} - \frac{1}{3}U_{BM} - \frac{1}{3}U_{AM}\right) = \frac{U_{dc}}{3}(2S_{C1} - S_{B1} - S_{A1}) \quad (8)$$

同理可得:

$$U_{BS} = \frac{U_{dc}}{3}(2S_{B1} - S_{C1} - S_{A1}) \quad (9)$$

$$U_{AS} = \frac{U_{dc}}{3}(2S_{A1} - S_{B1} - S_{C1}) \quad (10)$$

定义 U_{S3i} ($i = a, b, c$)表示倒闸调节器耦合变压器的一次侧电压, i_{Lj} ($j = a, b, c$)表示滤波电感的电流, i_{L3Z} ($Z = a, b, c$)表示隔离变压器一次侧电流, 以图4中的电流方向为参考方向, 根据基尔霍夫电流定律可以得到以下微分方程:

$$\begin{cases} L_S \frac{di_{La}}{dt} = -i_{La}R_m - U_{S3a} + \frac{U_{dc}}{3}(2S_{A1} - S_{B1} - S_{C1}) \\ L_S \frac{di_{Lb}}{dt} = -i_{Lb}R_m - U_{S3b} + \frac{U_{dc}}{3}(2S_{B1} - S_{A1} - S_{C1}) \\ L_S \frac{di_{Lc}}{dt} = -i_{Lc}R_m - U_{S3c} + \frac{U_{dc}}{3}(2S_{C1} - S_{B1} - S_{A1}) \\ C_S \frac{dU_{Sa3}}{dt} = i_{La} - i_{L3a} \\ C_S \frac{dU_{Sb3}}{dt} = i_{Lb} - i_{L3b} \\ C_S \frac{dU_{Sc3}}{dt} = i_{Lc} - i_{L3c} \end{cases} \quad (11)$$

由于式(11)是基于直角坐标系下的表达式, 可以将其转换到 $d-q$ 同步旋转系下, 现设定 $d-q$ 坐标系下的 d 轴相对于直角坐标系的初始位置为 α , 则变换矩阵 H 为

$$H = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \alpha) & \cos(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t + \alpha) & -\sin(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

具体变换过程参见文献[17], 将式(11)、式(12)变换后得

$$\begin{cases} L_S \frac{di_{Ld}}{dt} = -R_m i_{Ld} + \omega L_S i_{Lq} - u_{3d} + S_d U_{dc} \\ L_S \frac{di_{Lq}}{dt} = -R_m i_{Lq} - \omega L_S i_{Ld} - u_{3q} + S_d U_{dc} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_S \frac{dU_{3d}}{dt} = \omega C_S u_{3q} + i_{Ld} - i_{3d} \\ C_S \frac{dU_{3q}}{dt} = -\omega C_S u_{3d} + i_{Lq} - i_{3q} \end{cases} \quad (14)$$

式中: i_{Ld} 、 i_{Lq} 为流过电感 L_S 的电流; i_{3d} 、 i_{3q} 为耦合变压器一次侧电流在 $d-q$ 坐标下的分量; u_{3d} 、 u_{3q} 为耦合变压器在一次侧的电压; S_d 、 S_q 为开关函数 S_{ij} 在 $d-q$ 坐标下的分量。

3 柔性倒闸装置的控制系統

3.1 柔性倒闸装置的控制策略

柔性倒闸调节器的控制目标是输出一个电压的幅值、相位、频率与两母线电压差相等, 并逐渐减小输出电压, 实现两母线电压幅值、相位相等完成倒闸。由式(12)、式(13)可见, 柔性倒闸调节器的输出电压和电流在Park变换下的 d 轴和 q 轴分量之间存在较为复杂的耦合关系, 为了保证柔性倒闸调节器良好的调节性能, 必须对柔性倒闸调节器的输出电压和电流在旋转坐标系下进行解耦控制^[18-22]。

如图5所示, 整个系统采用在 $d-q$ 坐标系下的双闭环解耦控制, 其外环为母线电压差控制的电压环; 内环为电流控制的电流环。其中 U_{12d} 、 U_{12q} 分别为两母线电压差经过Park变换后在 $d-q$ 轴的直流量, 将这两个值与耦合变压器变比 K 作商, 再乘以调压系数0.98作为给定电压参考值 U_{12d}^* 、 U_{12q}^* , 将给定电压值与逆变器中耦合变压器一次侧的电压 U_{S3d} 、 U_{S3q} 作差, 经PI调节器产生电感电流给定信号 i_{Ld}^* 、 i_{Lq}^* , 再与电感电流反馈信号比较得到差值信号, 经过调节器形成对逆变器的控制, 并且解耦后 d 轴和 q 轴的电压、电流可实现独立控制^[23]。整个双闭环控制环节可以有效地使柔性倒闸调节器的输出电压跟随母线采集电压的改变而改变。其中电流内环的PI调节器中增加逆变器的阻尼系数, 提高系统的鲁棒性, 抑制电流冲击。锁相环节的信号主要来自两母线间的电压差 \dot{U}_{12a} 、 \dot{U}_{12b} 、 \dot{U}_{12c} , 用于实现频率和相位的跟踪。

3.2 控制系统电压、电流调节器的设计

柔性倒闸控制系统必须对双闭环控制器进行设计, 以及确定PI调节器的参数。首先是电流内环的设计, 解耦 d 轴和 q 轴控制可以有效减少输出电流

的延时以及提高电流跟踪能力, 并有效抑制调节过程的电流冲击^[24]。简化并分析电流环结构表达式可以实现电流环控制器的参数推导, 内环电流结构控制回路如图 6 所示。其结构包括前馈输出电压和输出滤波电感电压解耦部分, 并且此结构框图同样适用于 q 轴调节器, 因此 q 轴调节器省略。

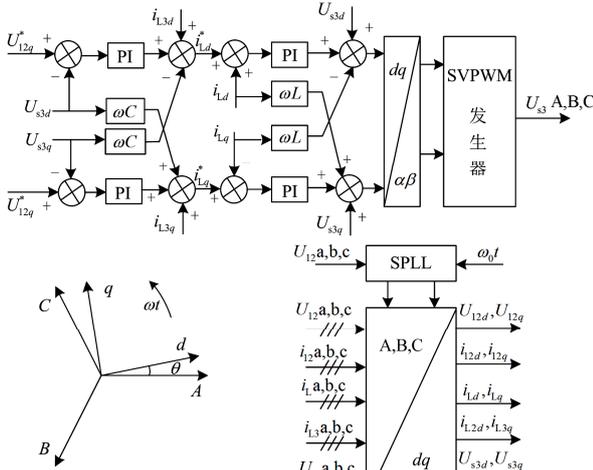


图 5 倒闸控制系统双闭环解耦控制图

Fig. 5 Double closed-loop decoupling control diagram of switch control system

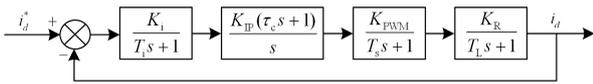


图 6 柔性倒闸调节器电流内环控制

Fig. 6 Flexible switching regulator current inner loop control

$$P_{oi}(s) = \frac{K_{IP} K_{PWM} (\tau_c s + 1) K_i K_R}{s(T_i s + 1)(T_s s + 1)(T_L s + 1)} \quad (15)$$

柔性倒闸调节器中设计电流环的目的是为了快速提高电流的输出响应, 提高系统电流的跟随性能。因此可以按照典型 I 型系统进行设计, 使 T_{sf} 代替式中的时间常数且令 $\tau_c = L/R$, 则校正之后的开环传递函数为

$$P_{oi}(s) = \frac{K_{IP} K_{PWM} K_i K_R}{s(T_{sf} s + 1)} \quad (16)$$

其闭环传递函数为

$$P_{ci}(s) = \frac{(1/T_{sf}) K_{IP} K_{PWM} K_i K_R}{s^2 + s(1/T_{sf}) + (1/T_{sf}) K_{IP} K_{PWM} K_i K_R} \quad (17)$$

并且可以得知 $\xi = (1/2)\sqrt{1/K_{IP} K_{PWM} K_i K_R}$ 及 $\omega_n = \sqrt{K_{IP} K_{PWM} K_i K_R / T_{sf}}$, 根据典型 I 型系统指标选 $\xi = 0.707$, 其他参数为: $K_i = 1$, $K_{PWM} = 0.3775$, $T_{sf} = 0.4 \text{ ms}$, $K_R = 12$, $\tau_c = 0.01$ 。

图 7 所示为同步参考坐标系中电压外环的控制

框图。它包括传输线电流前馈和输出滤波电容电流解耦组件, 其中 T_{uf} 是由于采样、处理时间和反馈滤波器引起的反馈回路延迟时间。

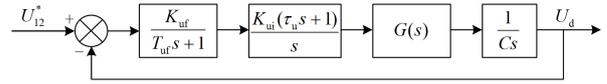


图 7 电压外环控制框图

Fig. 7 Block diagram of voltage outer loop control

内部电流控制回路用一阶模型进行转换为: $G(s) = 1/(2T_{sf}s + 1)$, 可以将电压外环结构框图中的时间常数合并为: $T_u = 3T_{sf}$, 则电压外环的开环传递函数为

$$P_{ou}(s) = \frac{K_{uf} K_{ui} (\tau_u s + 1)}{s^2 C (T_u s + 1)} \quad (18)$$

应用对称最优化方法对开环传递函数 $P_{ou}(s)$ 进行优化, 电压调节器开环传递函数的截止频率 ω_c 及 K_{ui} 为

$$\omega_c = \frac{1}{T_u d} \quad (h = \sqrt{\frac{\tau_u}{T_u}})$$

$$K_{ui} = C / (h T_u \tau_u K_{uf})$$

由此可以得到倒闸调节器电压外环的闭环传递函数为

$$P_{cu}(s) = \frac{(\tau_u s + 1)}{(h T_u s + 1)[h^2 T_u^2 s^2 + h(h-1)T_u s + 1]} \quad (19)$$

柔性倒闸调节器电压外环传递函数参数:

$$K_{uf} = 1, \quad T_u = 1 \text{ ms}, \quad C = 30 \mu\text{F}, \quad \tau_u = 5.67 \text{ ms}.$$

4 柔性倒闸调节装置的锁相控制

柔性倒闸调节装置输出的电压是与两条分列运行母线电压差同相位的基频电压, 因此锁相技术是倒闸调节的重要环节。

装置主要采用基于同步坐标系下的三相软件锁相技术^[25]。该锁相技术主要是在 $d-q$ 坐标下将三相电压、电流等变换成直流数据, 通过控制 q 轴的坐标分量来实现相位的快速准确跟踪, 其效果比传统锁相技术准确可靠^[26-28]。

该锁相技术的原理如下。假设两母线电压差的幅值、频率恒定, 各相之间相位相差 120° , 如图 8 所示, 供电母线电压差的空间合成向量为 \mathbf{u}_0 , 其角频率为恒定的工频角频率, 设 \mathbf{u}_0 与静止坐标系的 β 负半轴夹角为 θ_1 。现给定一个确定角频率 ω 的旋转 $d-q$ 坐标系, 假设其与静止坐标系的 β 负半轴的夹角为 θ , 电压向量 \mathbf{u}_0 在旋转坐标系中 q 轴的电压分量为 \mathbf{u}_{0q} , 当 $\mathbf{u}_{0q} = 0$ 时, 向量 \mathbf{u}_0 与 $d-q$ 坐标系中的 d

轴重合且角频率相等；当 $u_{0q} < 0$ 时，向量 u_0 滞后 d - q 坐标系中的 d 轴；当 $u_{0q} > 0$ 时，向量 u_0 超前 d - q 坐标系中的 d 轴。

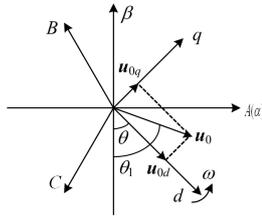


图 8 输出电压与电网电压矢量图

Fig. 8 Output voltage and grid voltage vector

由图 8 可知，向量 u_0 在旋转坐标系中 q 轴的分量为： $u_{0q} = u_0 \sin(\theta_1 - \theta) = u_{0\alpha} \cos \theta - u_{0\beta} \sin \theta$ ，由此可知当输入向量与输出向量同相位且角速度相同时 $u_{0q} = 0$ 。

旋转坐标系下锁相控制结构框图如图 9 所示。其中 ω_0 为 50 Hz， θ 为锁相环输出相角， $N = u_{0\alpha} \cos \theta - u_{0\beta} \sin \theta$ ，锁相环的控制是以 $u_{0q} = 0$ 为目标，以 u_{0q} 的大小作为反馈与 $u_{0q}^* = 0$ 比较，通过 PI 控制器和滤波环节以及频率积分环节的不断调控即可实现锁相控制。

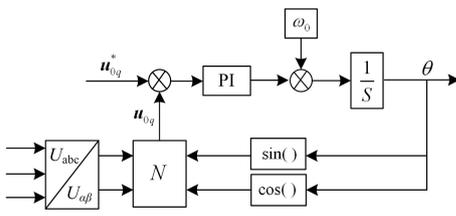


图 9 旋转坐标系下锁相控制结构图

Fig. 9 Phase-locked control structure diagram in rotating coordinate system

5 柔性倒闸调节装置的仿真研究

为了验证柔性倒闸操作装置的可行性，参照图 4 的拓扑结构，在 Matlab/Simulink 的仿真中搭建三相 6 kV 的柔性倒闸调节器的仿真系统。验证柔性倒闸装置的倒闸能力，采用表 1 所示的参数，在母线电压处于稳定的情况下进行，在 0.2 s 时将柔性倒闸调节器投入到系统中，由于给定电压 U_{12d}^* 、 U_{12q}^* 逐渐减小，倒闸调节器的输出电压跟随给定电压的变化可以得到柔性倒闸调节器的输出电压波形如图 10 所示，母线 I 与母线 II 电压波形随相位差变化过程如图 11 所示，两母线间电压差的减小使得母线间的电流会逐渐上升，两母线间的电流波形如图 12 所示。

表 1 柔性倒闸调节器的参数

Table 1 Parameters of flexible switchgear regulator		
倒闸调节器参数	符号	数值
母线 I 电压	U_1	5 943 V
母线 II 电压	U_2	6 000 V
直流电压值	U_{dc}	4 000 V
输出滤波电感	L_s	1 mH
输出滤波电容	C_s	30 μ F
串联变压器变比	T_1	3:4(Y- Δ)
系统两端电压相角差	φ	30°

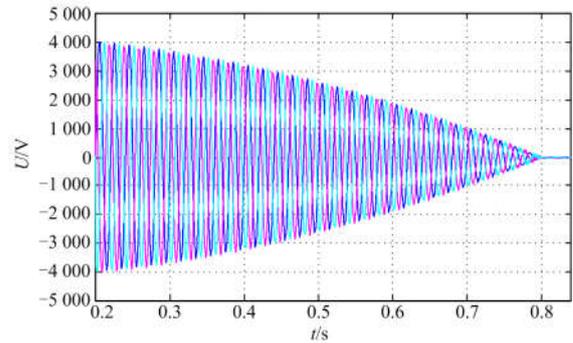


图 10 倒闸调节器输出电压波形

Fig. 10 Switch regulator output voltage waveform

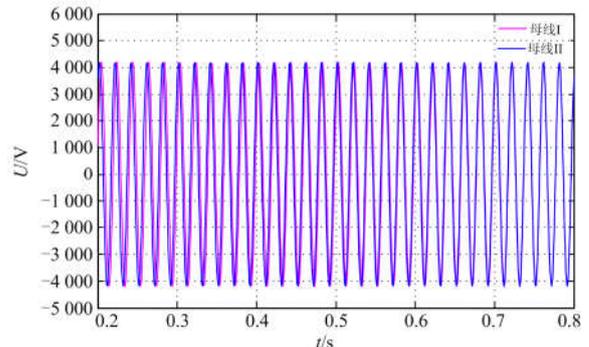


图 11 两母线电压波形随相位差变化过程

Fig. 11 Process of the voltage waveform of two busbars changing with the phase difference

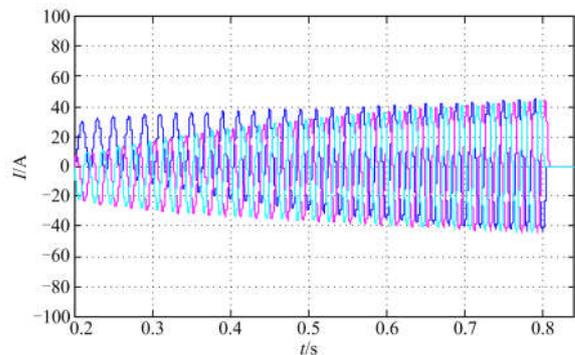


图 12 两母线间的电流波形

Fig. 12 Current waveform between two busbars

从图 10、图 11 可以看出, 在倒闸调节器的输出电压逐渐减小的过程中, 两条母线电压相位差也逐渐变为零, 最后实现两母线电压矢量差为零。

由仿真波形可知该模型系统在倒闸调节器投入后 0.8 s 即可完成倒闸调节过程, 在 0.82 s 时可以闭合开关将倒闸调节器从系统中切除。为了进一步检验倒闸调节器的实时跟随性能, 仿真过程中在 0.4 s 时设置两母线间的电压突然变大, 并对这种情况进行了仿真。其倒闸调节器输出电压的波形如图 13 所示, 两条母线电压波形随相位差变化过程如图 14 所示, 母线间电流波形如图 15 所示。

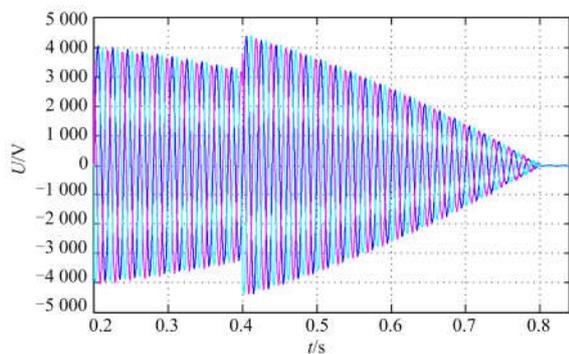


图 13 倒闸调节器的输出电压波形

Fig. 13 Output voltage waveform of switch regulator

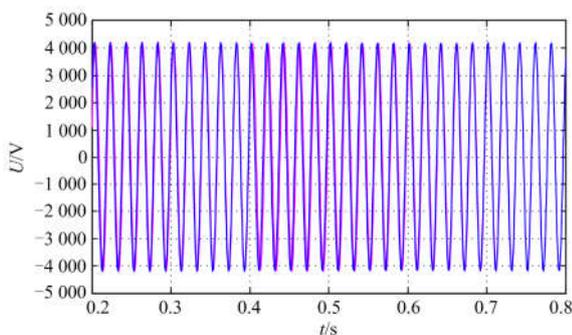


图 14 两母线电压波形随相位差变化过程

Fig. 14 Process of the voltage waveform of two busbars changing with the phase difference

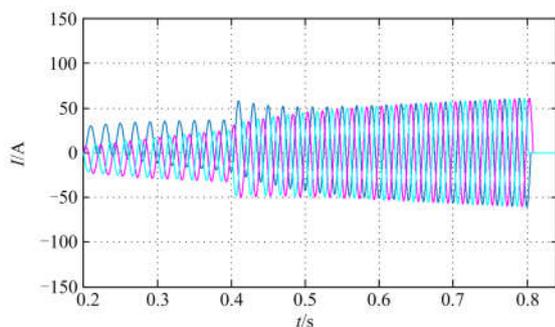


图 15 两母线间的电流波形

Fig. 15 Current waveform between two busbars

0.4 s 时母线间的电压变大, 由于倒闸调节装置的输出电压跟随母线间的电压变化, 倒闸调节装置在 0.4 s 时改变其输出电压, 其波形如图 13 所示。虽然调节装置输出电压跟随母线间电压差变化, 但是母线间电压突然变大会导致调节装置的输出电压与两母线间电压的差值增大, 使得母线间的电流增大, 其波形如图 15 所示, 但没有产生冲击电流, 其母线间的传输电流是为负荷提供的电流, 不会产生环流影响系统的安全。

6 结论

通过对柔性倒闸调节器的理论及工作原理进行分析, 建立数学模型, 并在 Matlab/Simulink 建立模型进行仿真与验证, 得到如下结论:

(1) 利用文中所述的控制系统可以快速地实现柔性倒闸调节器的倒闸操作, 验证了采用双闭环控制策略的有效性及其可行性。

(2) 文中柔性倒闸调节器中的电流调节器的积分环节有效减小电流环的稳态误差, 即使电压突变也不会产生冲击电流, 不会对电力系统造成危害。

(3) 柔性倒闸调节装置可以在不影响供电的情况下直接进行倒闸操作, 降低倒闸操作时间, 提高工作效率, 为电力系统倒闸操作提供新的方法途径。

参考文献

- [1] 栾伟杰, 程浩忠, 杨国健, 等. 考虑网络重构的配电网多目标运行方式优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 1-7.
LUAN Weijie, CHENG Haozhong, YANG Guojian, et al. Optimization of multi-objective operation mode of distribution network considering network reconstruction[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(10): 1-7.
- [2] 戴涛. 变电站倒闸操作风险点问题的探讨[J]. 自动化应用, 2016(9): 103-104.
DAI Tao. Discussion on risk points of substation switching operation[J]. Application of Automation, 2016(9): 103-104.
- [3] 刘自发, 张在宝, 杨滨, 等. 电网大停电社会综合损失评估[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2928-2940.
LIU Zifa, ZHANG Zaibao, YANG Bin, et al. Assessing the comprehensive social loss of the large power outage[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2928-2940.
- [4] 马龙义, 王好娜. 两例典型大停电事故对地区电网规划的启示[J]. 广东电力, 2015, 28(7): 50-54.
MA Longyi, WANG Haona. Enlightenment of two typical large power outages on regional grid planning[J].

- Guangdong Electric Power, 2015, 28(7): 50-54.
- [5] 王鹏, 陈旦, 周霞. 中国 2017 年度供电可靠性现状分析与展望[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 1-7, 138.
WANG Peng, CHEN Dan, ZHOU Xia. Analysis and prospect of the status of power supply reliability in 2017 in China[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 1-7, 138.
- [6] 刘若溪, 张振东, 崔学深, 等. 应急供电系统启动过程级联变压器合闸涌流分析[J]. 变压器, 2018, 55(7): 47-52.
LIU Ruoxi, ZHANG Zhendong, CUI Xueshen, et al. Analysis of closing inrush current of cascaded transformers during startup of emergency power supply system[J]. Transformer, 2018, 55(7): 47-52.
- [7] 王彦文, 赵铁英. 变压器有载合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 Tiesheng. 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.
- [8] 林明兰, 李刚, 钱络江, 等. 通用智能型电网调度操作票系统[J]. 继电器, 2001, 29(12): 39-42.
LIN Minglan, LI Gang, QIAN Luojiang, et al. A general intelligent system for electric power network operation order sheet[J]. Relay, 2001, 29(12): 39-42.
- [9] 陈威, 王昊, 夏慧, 等. 基于调控主站一体化平台的“一键”顺控操作实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 171-177.
CHEN Wei, WANG Hao, XIA Hui, et al. Implementation scheme of "one-button" sequential control operation based on the integrated platform of control master station[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 171-177.
- [10] 韩俊, 谢珍建, 黄河, 等. 基于停电损失计算与成本分析的配电网单元制供电网格可靠性规划[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 63-68, 117.
HAN Jun, XIE Zhenjian, HUANG He, et al. Reliability planning of power distribution grid based on power loss calculation and cost analysis[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 63-68, 117.
- [11] 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 Tiejue, ZHANG Wei, et al. Intelligent optimization algorithm based multi-objective optimal configuration for FACTS equipments[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2193-2199.
- [12] 汪玉凤, 吕飞. 基于 FACTS 技术无环流柔性倒闸装置研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 106-111.
WANG Yufeng, LÜ Fei. FACTS based flexible switching device without circulating current[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 106-111.
- [13] KANG Xiangli, LI Shouxiang, SMEDLEY K M. Decoupled PWM plus phase-shift control for a dual-half-bridge bidirectional DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7203-7213.
- [14] 赵永熹, 王华昕, 刘隽. 静止同步串联补偿器附加阻尼控制器设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 13-18, 24.
ZHAO Yongxi, WANG Huaxin, LIU Jun. Design method of additional damping controller for static synchronous series compensator[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 13-18, 24.
- [15] 汪玉凤, 孟娜, 王立辉, 等. 三相不平衡下 SSSC 的控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7): 67-72.
WANG Yufeng, MENG Na, WANG Lihui, et al. Control strategy of SSSC under three-phase imbalance[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(7): 67-72.
- [16] 刘黎明, 康勇, 朱鹏程, 等. SSSC 建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 37-43.
LIU Liming, KANG Yong, ZHU Pengcheng, et al. Static synchronous series compensator: modeling, control scheme and performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 37-43.
- [17] 熊健. 三相电压型高频 PWM 整流器研究[M]. 武汉: 华中科技大学, 1999.
- [18] 陆海峰, 瞿文龙, 张磊, 等. 基于调制函数的 SVPWM 算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 37-43.
LU Haifeng, QU Wenlong, ZHANG Lei, et al. SVPWM algorithm based on modulation functions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 37-43.
- [19] 盛超, 唐酿, 朱以顺, 等. 基于自抗扰控制技术的电压源变流器电流解耦控制方法[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 22-28.
SHENG Chao, TANG Niang, ZHU Yishun, et al. Current decoupling control method of voltage source converter based on active disturbance rejection control technology[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 22-28.
- [20] 邹振宇, 孙中尉, 修黎明, 等. 智能变电站信息模型组态解耦技术研究[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 78-82.
ZOU Zhenyu, SUN Zhongwei, XIU Liming, et al. Research on the configuration decoupling technology of intelligent substation information model[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 78-82.
- [21] 刘飞飞, 郭波超, 任舒琪, 等. 磁耦合谐振式供电系统的频率分裂抑制方法[J]. 河南师范大学学报: 自然科学

- 学版, 2018, 46(6): 22-26.
- LIU Feifei, GUO Bochao, REN Shuqi, et al. Frequency splitting suppression method of magnetic coupling resonance power supply system[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2018, 46(6): 22-26.
- [22] 侯利民, 李洪珠, 王巍. 空间电压脉宽调制SVPWM的原理及DSP的实现[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(6): 898-900.
- HOU Limin, LI Hongzhu, WANG Wei. Principle of SVPWM and its realization based on DSP[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(6): 898-900.
- [23] HUANG K P, WANG Y, WAI R J, et al. Design of power decoupling strategy for single-phase grid-connected inverter under nonideal power grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2938-2955.
- [24] 颜伟, 吴文胜, 华智明, 等. SSSC 非线性控制的直接反馈线性化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 65-68.
- YAN Wei, WU Wensheng, HUA Zhiming, et al. Direct feedback linearization method for designing SSSC nonlinear control law[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 65-68.
- [25] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 94-99, 121.
- GONG Jinxia, XIE Da, ZHANG Yanchi. Principle and performance of the three-phase digital phase-locked-loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 94-99, 121.
- [26] JANG T, JEONG S, JEON D, et al. A Noise reconfigurable all-digital phase-locked loop using a switched capacitor-based frequency-locked loop and a noise detector[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(1): 50-65.
- [27] 王佳浩, 潘欢, 纳春宁. 电网电压不平衡和谐波畸变下新型并网锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 108-115.
- WANG Jiahao, PAN Huan, NA Chunqing. Design of a new type of grid-connected phase-locked loop under grid voltage imbalance and harmonic distortion[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 108-115.
- [28] 朱建红, 黄琼, 孟棒棒. 基于 $\alpha\beta$ 分量滤波直接解耦风电并网锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 135-141.
- ZHU Jianhong, HUANG Qiong, MENG Bangbang. Design of directly decoupling wind power grid-connected phase-locked loop based on $\alpha\beta$ component filtering[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 135-141.

收稿日期: 2019-03-12

作者简介:

张国军(1960—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为供电系统柔性倒闸调节器的控制; E-mail: Zhangguojun_305@163.com

王 鹏(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为供电系统柔性倒闸调节器的控制; E-mail: 136664764@qq.com

于双立(1991—), 男, 硕士, 研究方向为供电系统柔性倒闸调节器的控制。E-mail: yanjiushengyu@163.com

(编辑 魏小丽)