柔性多状态开关的改进控制策略研究

范朕宁[1],苏强[1],张新民[1],赵长伟[1],徐科[2]
(1. 国网天津市电力公司 城东供电分公司,天津 300250;
2. 国网天津市电力公司,天津 300010)

摘要:柔性多状态开关(flexible multi-state switch,FMS)的控制策略是保证其高效可靠、灵活可控亟待解决的关键技术挑战。针对静止坐标系比例谐振调节器参数设计复杂且受电网频率扰动影响较大问题,提出了一种基于比例复数谐振(proportional complex resonant,PCR)控制器的柔性多状态开关改进控制方法。建立了静止坐标系下柔性多状态开关的数学模型,推导了静止坐标系与同步坐标系下控制策略的等效机理。为了保证柔性多状态开关实现多模式稳定运行,提出了整流侧和逆变侧变换器的灵活切换控制策略,并进行了详细分析。最终,通过Matlab/Simulink仿真软件搭建了柔性多状态开关的仿真模型,仿真结果验证了所提出控制策略可行性和有效性。

关键词:柔性多状态开关;运行模式;静止坐标系;协调控制;比例复数谐振控制器
中图分类号:TM28 **文献标识码**:B **DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd22692

Study on Improved Control Strategy of Flexible Multi-state Switch

FAN Zhenning[1],SU Qiang[1], ZHANG Xinmin[1], ZHAO Changwei[1],XU Ke[2]
(1.*Chengdong Power Supply Branch*,*State Grid Tianjin Electric Power Company*,
Tianjin 300250, *China*;2. *State Grid Tianjin Electric Power Company*,*Tianjin* 300010, *China*)

Abstract: The control strategy of flexible multi-state switch (FMS) is a key technical challenge to ensure its high efficiency, reliability and flexibility. In order to solve the problems that the parameter design of proportional resonant (PR) controller is complicated and is greatly affected by grid frequency disturbance in stationary reference frame, an improved control method of FMS based on proportional complex resonant (PCR) controller was proposed. The mathematical model of FMS was established in stationary reference frame, and the equivalent mechanism of control strategy in stationary reference frame and synchronization reference frame was deduced. In order to ensure the multi-mode stable operation of FMS, flexible switching control strategy of the rectifier side and inverter side converter were proposed and analyzed in detail. Finally, the simulation model of FMS was built by Matlab/Simulink simulation software, and the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy are verified by the simulation results.

Key words: flexible multi-state switch (FMS); operation mode; stationary reference frame; coordinated control; proportional complex resonant (PCR) controller

配电网不仅是输电网和电力用户的纽带,而且承担着电能分配、供给电力消费、服务客户的重任。随着大规模可再生能源分布式发电系统、多类型分布式储能单元、电动汽车以及可控负荷的集成接入,对配电网的供电可靠性、电能质量以及灵活控制能力提出了更高的要求。为了解决上述问题,传统配电网将由被动模式向主动模式转变,形成智能配电网[1-5]。随着半导体和电力电子技术的高速发展,智能电力电子设备被广泛接入智能配电网,柔性多状态开关(flexible multi-state switch,FMS)作为提升配电网灵活性及可靠性的关键电气设备,具有调节能力强、响应速度快、电流抑制以及故障隔离等优势,通过柔性多状态开关取代传统配电网联络开关,实现馈线之

基金项目:天津电力公司科技项目:基于柔性开关的交直流配电系统研究(KJ20-1-09)
作者简介:范朕宁(1992—),男,硕士,Email:15620523031@163.com

间柔性互联，使得配电网能够实现开环设计、闭环运行。将柔性多状态开关应用于智能配电网能够有效地改善系统潮流分布，提升配电网的可控性和灵活性[6-10]。

柔性多状态开关的控制策略是保证其高效可靠、灵活运行的关键技术。针对这一问题，文献[11]提出了三端口柔性多状态开关的双闭环控制策略，三个端口采用主从控制，主变换器采用直流/交流电压控制、从变换器采用PQ控制。文献[12]提出了柔性多状态开关的复合控制，柔性多状态开关两侧变换器均参与控制直流母线电压，能够实现有功功率和无功补偿同时独立调节。文献[13]提出了两端智能软开关（soft normally open point，SNOP）稳态与故障穿越控制策略，电网正常时采用PQ控制与直流电压/无功功率控制，在单相短路故障时采用d-q坐标系下正负序闭环控制策略抑制负序电流，消除功率振荡。文献[14-15]提出了三端FMS模型预测协调控制策略，针对不同运行模式下给出了基于模型预测控制（model predictive control，MPC）的PQ控制、直流电压/无功功率控制以及恒压恒频控制，解决了比例积分（proportion integration，PI）控制器参数多次整定问题。文献[16]提出了基于改进型线性扩张状态观测器的直流电压控制策略，与传统线性扩张状态观测器相比，提升了直流电压动态响应和抗扰动能力。文献[17]提出了柔性多状态开关并/离网平滑切换控制方法，与传统硬开关切换相比，能够减小电压和电流冲击，然而该方法仅考虑了PQ侧变换器交流侧电网故障情况。

基于上述分析可以得知，目前柔性多状态开关的控制策略主要在两相同步旋转坐标系下执行，存在坐标变换运算大、需要同步锁相环、解耦与前馈控制等问题。为了解决上述问题，通常采用静止坐标系下的控制策略，然而静止坐标系控制存在PR控制器参数设计复杂以及受电网频率扰动影响较大问题。此外，在多种运行模式切换控制研究中，传统方法考虑场景不全，没有考虑基于定直流电压控制的整流侧电网故障情形，当出现此情形时没有相应的协调控制算法将无法保证系统稳定运行。针对上述问题，本文提出一种基于比例复数谐振（proportional complex resonant，PCR）控制器的柔性多状态开关改进控制方法，同时提出了多运行模式下柔性多状态开关整流侧和逆变侧变换器的协调控制策略，最后通过仿真模型对所提出的控制策略进行了仿真研究。

1　系统结构与数学建模

柔性多状态开关的典型结构如图1所示。

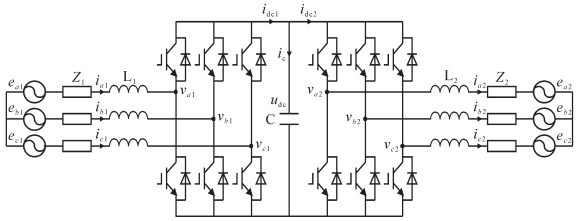


图1　柔性多状态开关的典型结构

Fig.1　The type structure of flexible multi-state switch

由图1可知，柔性多状态开关通常采用背靠背结构，包括两个电压源型变换器，中间接有大型直流母线电容C用于稳压滤波，交流侧接有滤波电感消除高频分量。柔性多状态开关在静止坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L_k \dfrac{\mathrm{d}i_{\alpha k}}{\mathrm{d}t} + R_k i_{\alpha k} = u_{\mathrm{dc}} s_{\alpha k} - e_{\alpha k} \\ L_k \dfrac{\mathrm{d}i_{\beta k}}{\mathrm{d}t} + R_k i_{\beta k} = u_{\mathrm{dc}} s_{\beta k} - e_{\beta k} \end{cases} \tag{1}$$

$$C \frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} = i_{\mathrm{dc1}} - i_{\mathrm{dc2}} \tag{2}$$

式中：L_k，R_k分别为滤波电感、等效串联电阻；$i_{\alpha k}$，$i_{\beta k}$分别为电感电流的α，β轴分量；$e_{\alpha k}$，$e_{\beta k}$分别为电网电压的α，β轴分量；$s_{\alpha k}$，$s_{\beta k}$分别为开关函数的α，β轴分量；u_{dc}为直流电压；下标k=1，2。

根据瞬时无功功率理论，能够得到静止坐标系下的有功、无功功率为

$$P_k = \frac{3}{2}(e_{\alpha k} i_{\alpha k} + e_{\beta k} i_{\beta k}) \tag{3}$$

$$Q_k = \frac{3}{2}(e_{\beta k} i_{\alpha k} - e_{\alpha k} i_{\beta k}) \tag{4}$$

根据式（3）、式（4）能够得到有功、无功电流：

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha k} \\ i_{\beta k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha \mathrm{p} k} \\ i_{\beta \mathrm{p} k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha \mathrm{q} k} \\ i_{\beta \mathrm{q} k} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{P_k}{e_{\alpha k}^2 + e_{\beta k}^2} \begin{bmatrix} e_{\alpha k} \\ e_{\beta k} \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q_k}{e_{\alpha k}^2 + e_{\beta k}^2} \begin{bmatrix} e_{\beta k} \\ -e_{\alpha k} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：$i_{\alpha \mathrm{p} k}$，$i_{\beta \mathrm{p} k}$分别为有功电流的α，β轴分量；$i_{\alpha \mathrm{q} k}$和$i_{\beta \mathrm{q} k}$分别为无功电流的α，β轴分量。

根据式（5），将功率参考值替换实际功率计算得到电流参考值α，β轴分量分别为

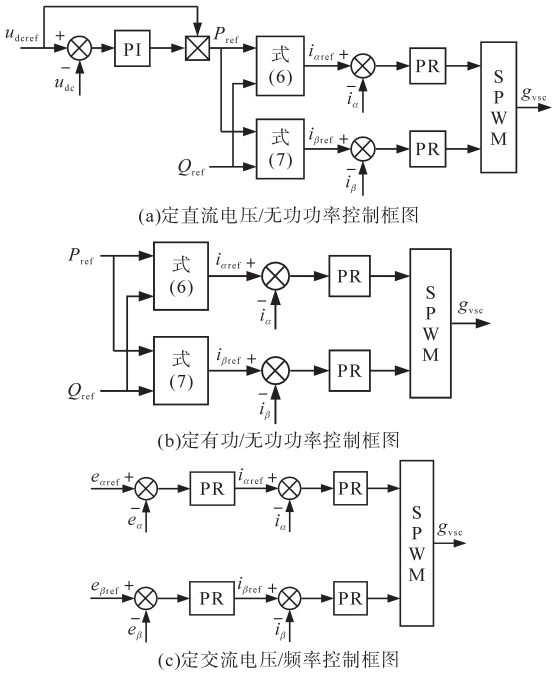
$$i_{\alpha k \mathrm{ref}} = \frac{2}{3} \frac{P_{k\mathrm{ref}} e_{\alpha k} + Q_{k\mathrm{ref}} e_{\beta k}}{e_{\alpha k}^2 + e_{\beta k}^2} \tag{6}$$

$$i_{\beta k \mathrm{ref}} = \frac{2}{3} \frac{P_{k\mathrm{ref}} e_{\beta k} - Q_{k\mathrm{ref}} e_{\alpha k}}{e_{\alpha k}^2 + e_{\beta k}^2} \tag{7}$$

式中：$P_{k\mathrm{ref}}$，$Q_{k\mathrm{ref}}$分别为有功、无功功率参考值。

2　静止坐标系下改进控制策略

由图1可知，在不同运行工况下两侧变流器主要包括定直流电压/无功功率控制、定有功/无功功率控制以及定交流电压/频率控制。由于同步旋转坐标系存在坐标变换运算大、需要解耦、前馈控制以及锁相环等问题，为了解决上述问题通常采用静止坐标系下的控制策略，如图2所示。



(a)定直流电压/无功功率控制框图

(b)定有功/无功功率控制框图

(c)定交流电压/频率控制框图

图2　静止坐标系下柔性多状态开关传统控制策略

Fig.2　Traditional control strategy of flexible multi state switch in stationary reference frame

由图2a可知，首先将采集的直流电压u_{dc}与直流电压参考值u_{dcref}相减得到电压误差信号，经过PI调节器得到直流电流，将其与电压参考值相乘得到有功功率参考值，将有功功率和无功功率参考值、电网电压的α，β分量送入式(6)和式(7)计算得到电流内环参考值，由于静止坐标系下误差信号为交流分量，为了实现零稳态误差跟踪，采用比例谐振(proportional resonant，PR)控制器得到调制信号，最后经过正弦脉宽调制策略得到驱动脉冲。

图2b给出了定有功/无功功率控制框图，由于电网电压被钳位，可以直接通过控制并网电流对有功和无功功率进行控制，系统有功和无功功率参考值可根据运行状态由上层调度系统给出，与图2a对比可知，电流内环控制结构相同，在此不再赘述。与传统功率外环和电流内环双闭环控制结构相比，所提出控制策略的结构得到了简化，同时动态响应速度也相应得到了提升。

若柔性多状态开关某一侧发生短路故障时，为了保证交流侧重要负荷不间断供电，需要采用定交流电压/频率控制，其控制框图如图2c所示。图中包括电压外环和电流内环，将电压外环参考值分别与实际负载端电压相减得到交流误差信号，然后经过PR控制器得到电流内环参考值，再进行电流内环控制，最终生成驱动信号。

由上述分析可知，虽然在静止坐标系下执行柔性多状态开关的控制算法能够带来一定优势，然而也引起了新的技术挑战，其中最为突出问题为PR控制器参数设计复杂以及容易受到电网频率扰动影响。根据以往研究可知，PI控制器参数最优设计方法成熟，在工程应用中较为广泛，得到了众多工程师的使用，而PR调节器参数并没有一种成熟的设计方法，需要重复设计。针对这一问题，本文提出了一种比例复数谐振(proportional complex resonant，PCR)控制器。在两相同步旋转坐标系下，柔性多状态开关的数学模型为

$$\begin{cases} L_k\dfrac{\mathrm{d}i_{dk}}{\mathrm{d}t}+R_ki_{dk}-\omega L_ki_{qk}=u_{\mathrm{dc}}s_{dk}-e_{dk} \\ L_k\dfrac{\mathrm{d}i_{qk}}{\mathrm{d}t}+R_ki_{qk}+\omega L_ki_{dk}=u_{\mathrm{dc}}s_{qk}-e_{qk} \end{cases} \tag{8}$$

式中：i_{dk}，i_{qk}分别为电感电流的d，q轴分量；e_{dk}，e_{qk}分别为电网电压的d，q轴分量；s_{dk}，s_{qk}分别为开关函数的d，q轴分量。

将式(8)经过拉普拉斯变换，整理得到：

$$\begin{cases} i_{dk}(s)=\dfrac{u_{\mathrm{dc}}(s)s_{dk}-e_{dk}(s)+\omega L_ki_{qk}(s)}{L_ks+R_k} \\ i_{qk}(s)=\dfrac{u_{\mathrm{dc}}(s)s_{qk}-e_{qk}(s)-\omega L_ki_{dk}(s)}{L_ks+R_k} \end{cases} \tag{9}$$

根据前文分析可知，同步旋转坐标系下的电流控制闭环传递函数框图如图3所示。

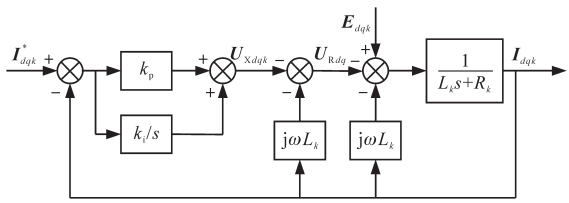


图3　d-q坐标系下的电流控制闭环传递函数

Fig.3　Transfer function of current control closed loop in d-q coordinate system

根据图3，能够得到：

$$T_{dq}(s)=\frac{\boldsymbol{I}_{dqk}(s)}{\boldsymbol{I}_{dqk\mathrm{ref}}(s)}\Big|_{\boldsymbol{E}_{dqk}(s)}=\frac{k_{\mathrm{p}}s+k_{\mathrm{i}}}{L_k s^2+s(R_k+k_{\mathrm{p}})+k_{\mathrm{i}}}\quad(10)$$

式中：k_{p}，k_{i}分别为比例、积分系数；$\boldsymbol{I}_{dqk}$为d，q轴电流矢量；$\boldsymbol{I}_{dqk\mathrm{ref}}$为$d$，$q$轴参考电流矢量；$\boldsymbol{E}_{dqk}$为电网电压矢量。

根据dq变换与$\alpha\beta$变换矩阵间的关系得到：

$$\boldsymbol{I}_{\alpha\beta k\mathrm{ref}}(s)=\boldsymbol{I}_{dqk\mathrm{ref}}(s)(s-\mathrm{j}\omega)\quad(11)$$

$$\boldsymbol{I}_{\alpha\beta k}(s)=\boldsymbol{I}_{dqk}(s)(s-\mathrm{j}\omega)\quad(12)$$

式中：ω为基波角频率。

由式(11)、式(12)，可得到静止坐标系和同步旋转坐标系下传递函数之间的关系如下：

$$T_{dq2\alpha\beta}(s)=\frac{\boldsymbol{I}_{\alpha\beta k}(s)}{\boldsymbol{I}_{\alpha\beta k\mathrm{ref}}(s)}=T_{dq}(s)(s-\mathrm{j}\omega)\quad(13)$$

将式(10)代入式(13)可得到：

$$T_{dq2\alpha\beta}(s)=\frac{(s-\mathrm{j}\omega)k_{\mathrm{p}}+k_{\mathrm{i}}}{(s-\mathrm{j}\omega)^2L_k+(s-\mathrm{j}\omega)(R_k+k_{\mathrm{p}})+k_{\mathrm{i}}}\quad(14)$$

将式(14)和式(10)进行对比可知，与同步旋转坐标系下等效后的控制对象和PCR调节器为

$$G_{\mathrm{P}\alpha\beta}(s)=\frac{1}{(s-\mathrm{j}\omega)L_k+R_k}\quad(15)$$

$$G_{\mathrm{PCR}}(s)=k_{\mathrm{p}}+\frac{\mathrm{j}\omega k_{\mathrm{i}}}{s^2+\omega^2}+\frac{k_{\mathrm{i}}s}{s^2+\omega^2}\quad(16)$$

由式(15)、式(16)可得到采用PCR控制器的控制框图如图4所示。

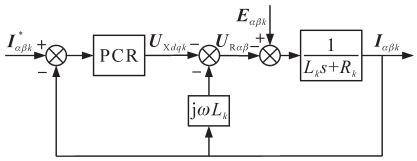


图4　基于PCR控制器的电流控制闭环传递函数

Fig.4　Closed loop transfer function of current control based on PCR controller

根据前面推导可知，所提出改进控制与经典dq解耦控制等效，因此无需重复设计电流内环控制器参数，进而解决了静止坐标系下控制器设计复杂问题。为了进一步说明所提出PCR控制器的优势，绘制PR调节器和PCR调节器的闭环传递函数幅频特性如图5所示。

由图5可知，采用PR和PCR控制器在50 Hz下，其幅值均为1(标幺值)，表明两种调节器都能够实现交流分量的零稳态误差调节。然而实际电网的电网频率往往存在一定偏离，当电网频率出现偏差时，由图5可知，PR调节器对频率变化敏感度强，而PCR调节器则较弱，因此采用PCR调节器能够获得更好的鲁棒性。

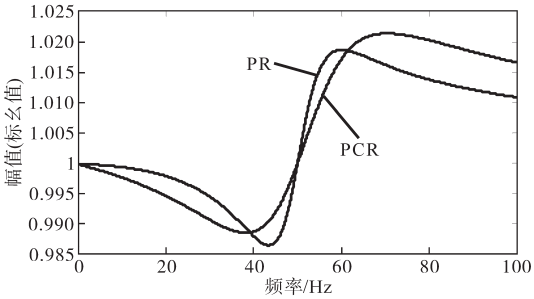
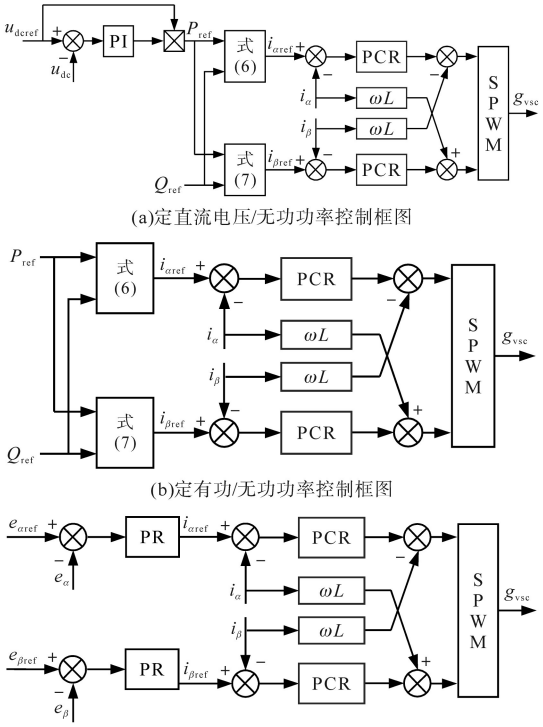


图5　PR和PCR控制的闭环幅频特性

Fig.5　Closed loop amplitude frequency characteristics based on PR and PCR control

柔性多状态开关改进控制策略如图6所示。



(a)定直流电压/无功功率控制框图

(b)定有功/无功功率控制框图

(c)定交流电压/频率控制框图

图6　静止坐标系下柔性多状态开关改进控制策略

Fig.6　Improved control strategy of flexible multi-state switch in stationary reference frame

将图6与图2对比可知，采用本文所提出的PCR调节器无需改变整个系统的控制架构，仅需替换传统PR调节器，并增加解耦环节，易于实现。

3　柔性多状态开关多模式协同控制策略

与传统联络开关不同，柔性多状态开关不仅具备传统开关通/断功能，还具备潮流转移、故障隔离以及不间断供电等职能。为了充分发挥柔性多状态开关的职能，柔性多状态开关的控制策略至关重要。在实际运行中，柔性多状态开关根

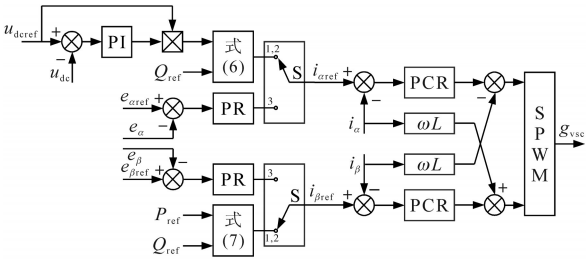
据电网情况主要分为电网正常和电网故障情形，下面对柔性多状态开关的运行模式进行分析。

1）运行模式1：指电网正常运行情况。当柔性多状态开关处于该运行模式时，其中整流侧变换器采用定直流电压/无功功率控制维持直流母线电压恒定，而逆变侧变换器根据上层能量管理系统或者调度系统下发的功率指令工作在功率控制模式。

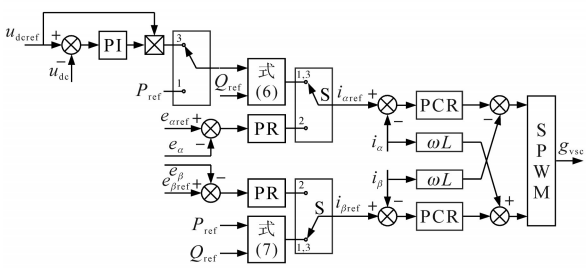
2）运行模式2：指柔性多状态开关逆变侧电网发生三相短路故障。当柔性多状态开关处于该运行模式时，其中整流侧变换器控制策略保持不变，仍然控制直流母线电压，而为了保证交流侧本地重要负载的不间断供电，逆变侧变换器需求切换控制模式来维持故障侧交流母线电压和频率稳定。

3）运行模式3：指柔性多状态开关整流侧电网发生三相短路故障。当柔性多状态开关处于该运行模式时，为了保证整流侧本地重要负载的不间断供电，整流侧变换器需求切换控制模式来维持故障侧交流母线电压和频率稳定，而逆变侧也需要切换控制方式来保证直流母线电压稳定，因此整流侧和逆变侧变换器需要协调配合。

为了保证柔性多状态开关能够在上述三种运行模式稳定运行，本文所提出的多模式运行协同控制策略如图7所示。



(a)整流侧变换器的控制框图



(b)逆变侧变换器的控制框图

图7　多模式运行协同控制策略

Fig.7　Cooperative control strategy for multi mode operation

由图7可知，在电网正常时，控制开关S接入1，整流侧变换器采用定直流电压/无功功率控制，逆变侧变换器采用PQ控制策略；当逆变侧电网发生三相短路故障，经过孤岛检测后触发开关S接入2，此时逆变侧变换器由PQ控制切换至静止坐标系下的定交流电压/频率控制，维持交流母线电压和频率稳定，保证故障侧重要负荷不间断供电；当整流侧电网发生三相短路故障，开关S接入3，整流侧变换器将由直流母线电压控制切换至定交流电压/频率控制维持故障侧交流母线电压和频率稳定，同时为了保证柔性多状态开关稳定运行，此时逆变侧变换器应由PQ控制切换至定直流电压/无功功率控制维持中间直流母线电压恒定。

4　仿真验证

为了验证所提出控制策略的有效性和可行性，通过Matlab/Simulink仿真软件搭建柔性多状态开关的仿真模型，系统仿真结构如图8所示。图8中两侧交流馈线线电压有效值为10 kV，频率为50 Hz，直流母线电压为20 kV，柔性多状态开关容量为10 MV•A，交流滤波电感为5 mH，直流母线电容为10 mF。

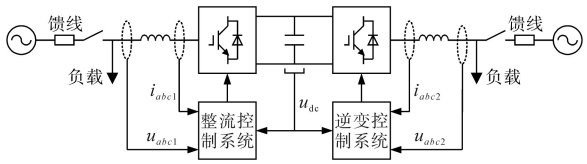
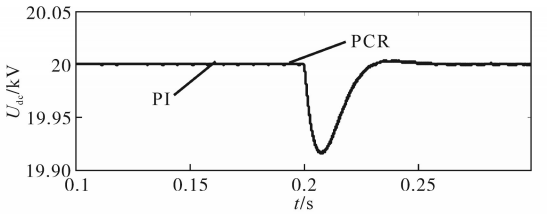


图8　柔性多状态开关的仿真模型

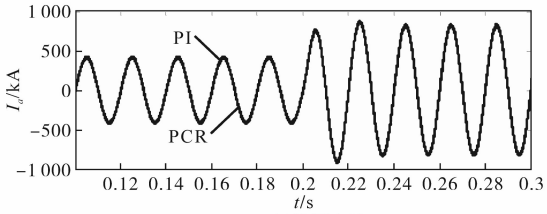
Fig.8　The simulation model of FMS

4.1　所提出控制与d-q坐标系下PI控制对比

为了更好的说明所提出PCR调节器的有效性，首先将其与d-q坐标系下的PI控制进行对比，仿真结果如图9所示。



(a)直流母线电压



(b)a相并网电流

图9　PCR和PI控制下的对比结果

Fig.9　Comparison results of PCR and PI control

仿真系统中，FMS整流侧变换器控制直流母

线电压，逆变侧变换器控制功率，初始功率参考值为5 MW；在0.2 s时，逆变侧功率由5 MW突增至10 MW。由图9可以看出，两种不同控制所得到的直流电压和电网电流输出结果完全重合，进而证明了本文所提出的静止坐标系下PCR控制与同步旋转坐标系下的PI控制等效，避免了参数重复设计问题。

4.2 所提出控制与α-β坐标系下PR控制对比

为了进一步验证PCR调节器对电网频率变化具有更好的鲁棒性，将其与传统PR控制进行对比，仿真结果如图10所示。

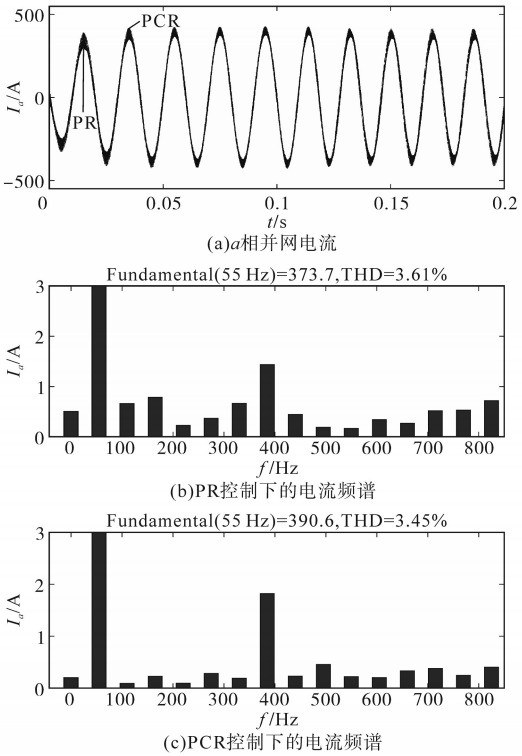


图10　PCR和PR控制下的对比结果

Fig.10　Comparison results of PCR and PR control

假设初始电网频率为50 Hz，在0.1 s时突变为55 Hz，由图10看出，在启动瞬间所提出PCR控制器具有更快的动态响应速度。在电网频率发生偏移时，PCR和PR控制器的动态响应速度存在较小差别，PR控制器响应速度比PCR控制器略快一些。比较两者的电网电流谐波频谱分析可知，PCR控制器所得到的稳态电流精度更高，THD更小，进而验证了PCR控制器具有更好的鲁棒性。

4.3 逆变侧电网故障情况下的仿真结果

前面对所提出的PCR控制器性能进行了仿真验证。下面对基于PCR控制器的柔性多状态多运行模式协同控制策略进行仿真研究。首先对逆变侧电网三相短路故障情况进行仿真研究，仿真结果如图11所示。

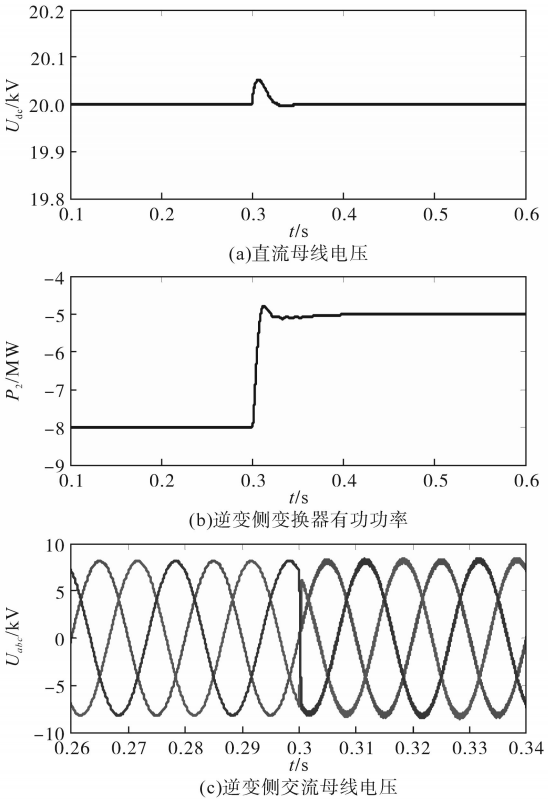


图11　逆变侧电网故障情况下柔性多状态开关的仿真结果

Fig.11　The simulation results of FMS under inverter-side grid fault conditions

由图11可知，初始条件下两侧电网正常，逆变侧变换器采用PQ控制，整流侧变换器控制直流母线电压，初始有功和无功功率参考值分别为−8 MW和0 Mvar，逆变器输出功率能够快速跟踪参考值，直流母线电压由整流侧变换器稳定在20 kV。在0.3 s时，逆变侧电网发生三相短路故障，当检测到发生孤岛后，逆变侧变换器由PQ控制切换至恒压恒频控制策略维持交流母线电压和频率稳定，为5 MW的交流负载进行不间断供电。由图11c可知，交流母线电压在10 ms以内过渡到稳态，同时看出切换过程中没有电压冲击，系统动态性能良好。

4.4 整流侧电网故障情况下的仿真结果

在此对整流侧电网三相短路故障情况进行仿真研究，仿真结果如图12所示。

由图12可知，初始条件下两侧电网正常，逆变侧变换器采用PQ控制，初始有功和无功功率参考值分别为5 MW和0 Mvar，逆变器输出功率能够快速跟踪参考值，直流母线电压由整流侧变换器稳定在20 kV。在0.3 s时，整流侧电网发生三相短路故障，检测到发生孤岛后，整流侧变换器由直流

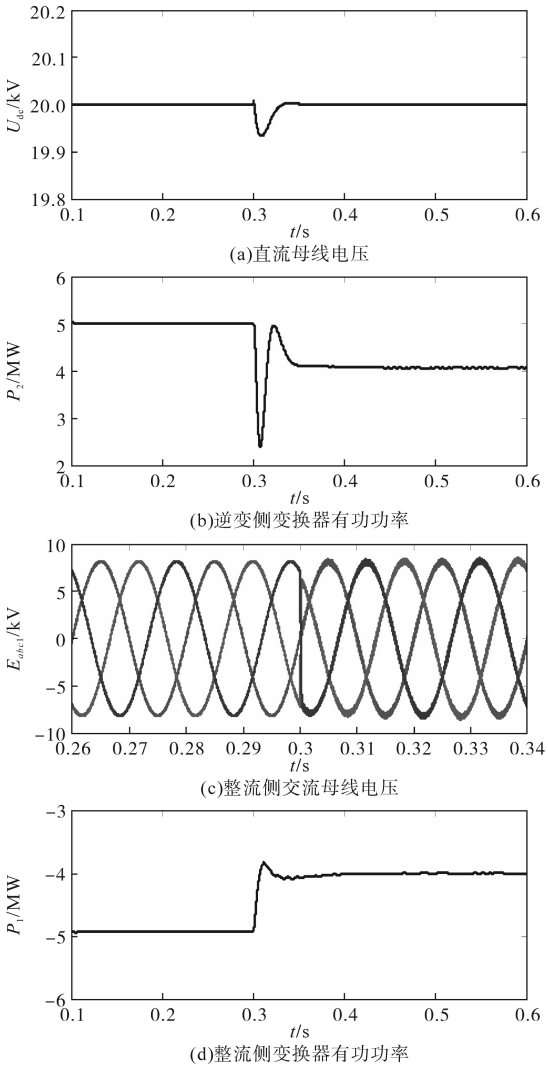


图12　整流侧电网故障情况下柔性多状态开关的仿真结果

Fig.12　The simulation results of FMS under rectifier-side grid fault conditions

母线电压控制切换至恒压恒频控制策略，维持交流母线电压和频率稳定，而为了保证直流母线电压稳定，逆变侧变换器由PQ控制切换至直流母线恒压控制，维持直流母线电压为20 kV。整流侧交流母线电压能够快速稳定，为4 MW的交流负载提供不间断供电。与逆变侧故障情况不同，由于整流侧变换器控制直流母线，因此当整流侧发生三相短路故障时，整流侧和逆变侧变换器需要协调配合同时切换控制模式来维持交、直流母线电压稳定，此外由图12c看出，在故障发生后交流母线电压在10 ms以内过渡到稳态，且切换过程中没有电压冲击，系统动态响应速度快。

5　结论

针对柔性多状态开关静止坐标系下PR调节器参数设计复杂以及受电网频率扰动影响较大问题，提出了一种基于PCR调节器的改进控制策略。仿真结果表明所提出改进控制与经典dq解耦控制等效，无需重复设计PCR控制器参数，同时在电网频率偏移情况下具有更好的波形质量和鲁棒性。在柔性多状态开关多模式协同控制中，考虑了整流侧和逆变侧电网故障两种情况，通过整流侧和逆变侧变换器的协同控制能够保证直流母线和故障侧交流电压/频率稳定，为交流负载提供不间断供电。同时，从仿真结果中可以看出所提出控制策略能够保证柔性多状态开关在三种不同运行模式下稳定运行，实现了多种运行模式的平滑过渡。

参考文献

[1]　赵波，王财胜，周金辉，等.主动配电网现状与未来发展[J].电力系统自动化，2014，38(18)：125-136.
Zhao Bo，Wang Caisheng，Zhou Jinhui，*et al*. Present and future development trend of active distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems，2014，38(18)：125-136.

[2]　马钊，周孝信，尚宇炜，等.未来配电系统形态及发展趋势[J].中国电机工程学报，2015，35(6)：1289-1298.
Ma Zhao，Zhou Xiaoxin，Shang Yuwei，*et al*.Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(6)：1289-1298.

[3]　孟明，魏怡，朱国林，等.基于智能软开关的交直流主动配电网优化控制策略研究[J].现代电力，2019，36(2)：1-7.
Meng Ming，Wei Yi，Zhu Guolin，*et al*.Research on optimal control strategy of AC/DC active distribution networks based on soft open point[J]. Modern Electric Power，2019，36(2)：1-7.

[4]　Li Yang，Feng Bo，Li Guoqing，*et al*. Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage[J]. Applied Energy，2018，210：1073-1081.

[5]　Jin Peng，Li Yang，Li Guoqing，*et al*. Optimized hierarchical power oscillations control for distributed generation under unbalanced conditions[J]. Applied Energy，2017，194：343-352.

[6]　王成山，宋关羽，李鹏，等.基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J].电力系统自动化，2016，40(22)：168-175.
Wang Chengshan，Song Guanyu，Li Peng，*et al*.Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(22)：168-175.

[7]　杨勇，李继红，周自强，等.智能配电柔性多状态开关技术、装备及示范应用[J].高电压技术，2020，46(4)：1105-1113.
Yang Yong，Li Jihong，Zhou Ziqiang，*et al*. Technology，equipment and demonstration application of flexible multi-

state switch in intelligent distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1105-1113.

[8] 贾冠龙, 陈敏, 赵斌, 等. 柔性多状态开关在智能配电网中的应用[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1760-1768.
Jia Guanlong, Chen Min, Zhao Bin, *et al*. Application of flexible multi-state switch in intelligent distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1760-1768.

[9] Ji Haoran, Wang Chengshan, Li Peng, *et al*. An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2018, 208: 986-995.

[10] Cao Wanyu, Wu Jianzhong, Jenkins Nick, *et al*. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165: 36-47.

[11] Hou Yuxin, Xu Yiming, Wang Zhiqiang, *et al*. Research on application of three-port SNOP based on dual closed-loop control in distribution network[C]//IEEE International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), Chennai, India, 2017: 389-395.

[12] 霍群海, 粟梦涵, 吴理心, 等. 柔性多状态开关新型复合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 166-170.
Huo Qunhai, Su Menghan, Wu Lixin, *et al*. Compound control strategy for flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 166-170.

[13] Li Yuze, Pei Xuejun, Chen Zhi, *et al*. The steady-state and fault ride-through control strategies of soft normally open point in distribution network [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 2018: 1146-1150.

[14] 张国荣, 彭勃, 解润生, 等. 柔性多状态开关模型预测协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 123-136.
Zhang Guorong, Peng Bo, Xie Runsheng, *et al*. Predictive synergy control strategy for flexible multi-state switch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 123-136.

[15] Peng Bo, Zhang Guorong. Coordination control strategy for three-port SNOP based on FCS-MPC[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16(3): 1005-1010.

[16] 沈聪, 张国荣, 彭勃, 等. 具备干扰抑制能力的柔性多状态开关直流电压控制策略[J], 高电压技术, 2020, 46(4): 1198-1205.
Shen Cong, Zhang Guorong, Peng Bo, *et al*. DC voltage control strategy of flexible multi-state switch with disturbance rejection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1198-1205.

[17] 张国荣, 朱一鸣, 彭勃, 等. 基于三端口柔性多状态开关不同运行模式间的切换技术[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 1-8.
Zhang Guorong, Zhu Yiming, Peng Bo, *et al*. Switching technology of different operating modes based on three-port flexible multi-state switch[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 1-8.

收稿日期:2020-11-18
修改稿日期:2021-02-08