

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190040

基于三端口柔性多状态开关的电压波动治理研究

张国荣¹, 马晓芳¹, 彭勃¹, 杨勇², 陆翌³, 王朝亮³

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000;
3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 配电网内间歇性分布式电源和负荷的波动性使系统的运行稳定性、调控灵活性受到制约。对于大面积零散分布的工厂负荷和居民负荷, 单端电压波动治理设备已无法满足要求。针对上述问题, 研究了用于多条馈线互联的柔性多状态开关(Flexible Multi-state Switch, FMSS)电压波动治理技术。基于三端口 FMSS 的拓扑分析, 分析了 FMSS 与三端馈线进行功率交换的原理。利用解耦控制策略, 实现装置同时独立进行有功潮流和无功补偿两种功能。搭建了仿真模型, 进行配电网三条馈线潮流控制和无功补偿功能验证。然后提出了无功协调控制优化模型, 实现了多重化控制。仿真和优化结果显示, 所提的开关模型电压波动治理快速有效。

关键词: 配电网; 柔性多状态开关; 双闭环控制策略; 电压波动

Distribution network voltage fluctuation control based on flexible multi-state switch

ZHANG Guorong¹, MA Xiaofang¹, PENG Bo¹, YANG Yong², LU Yi³, WANG Chaoliang³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. State Grid Zhejiang
Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In the distribution network, the stability and flexibility are limited due to intermittent distributed power and loads. For scattered factory and residents, single-ended voltage fluctuation control equipment can't meet the requirements. This paper studies the Flexible Multi-State Switch (FMSS) voltage fluctuation control technology for multiple feeder interconnections. Based on topology analysis, the power exchange principle is analyzed between FMSS and three-terminal feeder. The decoupling control strategy is used to realize active power flow and reactive power compensation independently. The simulation model is built to verify the above two functions. Then the multiple control is realized by the reactive power coordination control optimization model. Simulation and optimization results show that the switch model is fast and effective.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521104170043).

Key words: distribution network; flexible multi-state switch; double closed loop control strategy; voltage fluctuation

0 引言

未来电力系统趋于智能电网模式, 而智能配电网是智能电网的重要组成部分, 其安全可靠、优质高效的运行是保证电力系统稳定性的关键环节^[1-4]。相对于配电二次系统的快速发展, 配电网一次装备技术的发展多集中在“源”和“荷”层面, 在配

“网”层面缺少可支持电网灵活调度与控制的柔性调节装置^[5-6]。而基于全控型电力电子器件的 FMSS 设备, 由软常开开关(Soft Normally-Open Point, SNOP)发展而来, 将 SNOP 从两端口扩展到三端或多端口, 能够实现多种运行调控状态的转换, 彻底改变传统配电网闭环设计、开环运行的供电方式, 具有调节柔性功率、治理电压波动及解决供电中断故障等能力, 在简化保护策略的同时具有较高的可靠性^[7-11]。

目前, 对于配电网电压波动的治理问题, 国内

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903100);
国家电网公司科技项目资助(521104170043)

外一般采用有源电力滤波器(APF)、配电网静止同步补偿器(STATCOM)、统一潮流控制器(UPFC)等设备进行治理,但这些设备仅能连接单条馈线或交流系统,无法实现功率潮流互济^[12-14]。基于多端 FMSS 配电网调控技术的电压波动治理技术的研究尚处于初级阶段。文献[15]仅验证了 FMSS 感性无功补偿性能,文献[16]仅从电压跌落工况方面分析 FMSS 的隔离扰动性能,文献[17]模拟讨论了 FMSS 对轧钢厂或轧铝厂接入电压波动的平抑效果。但总体来讲,此类研究还较少。

基于以上问题,本文探讨了三端口 FMSS 在配电网中的电压波动治理问题。针对负载切换引起的瞬时电压波动和非线性负载周期性电压波动问题,进行无功补偿调节,研究 FMSS 电能质量改善情况,并进行 Matlab/Simulink 仿真验证治理效果;建立以节点电压偏离规定值之和最小为目标函数的 FMSS 接入配电网系统优化模型,考虑功率平衡约束条件,在 GAMS 平台使用非线性求解器(DNLP)进行无功优化补偿的计算。

1 三端口柔性多状态开关建模

三端口 FMSS 由三个电压源型变流器(VSC1, VSC2, VSC3)组成,如图 1 所示,中间通过直流侧电容器 C 连接而成。由于三个变流器对称且结构相同,本文以 VSC1 侧为例建立数学模型,其主电路拓扑如图 2 所示,等效阻抗 R 表示变流器与相应线路的损耗,电抗器 L 用于滤除变流器输出的电流谐波,电容器 C 提供直流侧电压支撑和减少纹波。

基于 $d-q$ 同步旋转坐标系下的动态微分方程为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{d1} U_{dc} - E_{d1} \\ m_{q1} U_{dc} - E_{q1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum (m_{dj} i_{dj} + m_{qj} i_{qj}) \quad (2)$$

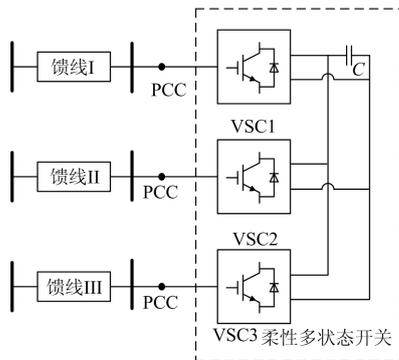


图 1 FMSS 接入配电网系统框图

Fig. 1 Block diagram of FMSS in distribution system

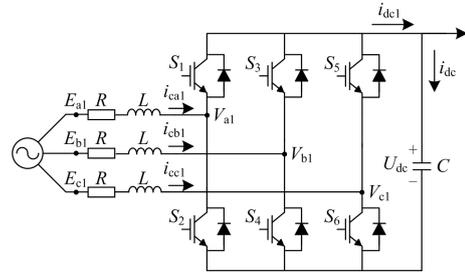


图 2 VSC1 侧主电路拓扑

Fig. 2 Main circuit topology of VSC1

式(1)、式(2)中: $j=1, 2, 3$, 下文中出现的下标 j 均为同样取值; ω 为交流系统角频率; i_{d1} 、 i_{q1} 分别为 VSC1 的 d 、 q 轴输出电流; m_{d1} 、 m_{q1} 分别为 VSC1 开关调制函数的 d 、 q 轴分量; E_{d1} 和 E_{q1} 分别为 VSC1 交流侧并联系统电压矢量的 d 、 q 轴分量; U_{dc} 为直流侧电压。

根据瞬时无功功率理论,忽略变流器和开关损耗,三端口输入(输出)功率为

$$\begin{cases} P_j = \frac{3}{2} (E_{dj} i_{dj} + E_{qj} i_{qj}) = U_{dc} i_{dcj} \\ Q_j = \frac{3}{2} (E_{qj} i_{dj} - E_{dj} i_{qj}) \end{cases} \quad (3)$$

2 控制策略

2.1 控制系统结构设计

由公式(3)可知,系统稳态运行时, E_{dj} 、 E_{qj} 恒定,控制 i_{dj} 、 i_{qj} 即可控制有功潮流和无功补偿。据此设计 FMSS 系统为内外双闭环控制结构,如图 3 所示。

由式(2)、式(3)可知,为确保系统安全运行,三端口 FMSS 需协调控制,一侧 VSC 维持直流侧电压平稳,另两侧 VSC 控制系统有功和无功功率的传输。FMSS 可依据实际需要交换三侧 VSC 的外环控制目标,实现有功、无功功率或交流侧端电压的准确控制。

2.2 外环控制

2.2.1 有功功率与无功功率的控制

依据式(3)变换设计有功与无功功率控制的逆稳态模型^[18-19]:

$$i = \begin{cases} i_d = \frac{2 E_d P_{ref} + E_q Q_{ref}}{3 E_d^2 + E_q^2} \\ i_q = \frac{2 E_q P_{ref} - E_d Q_{ref}}{3 E_d^2 + E_q^2} \end{cases} \quad (4)$$

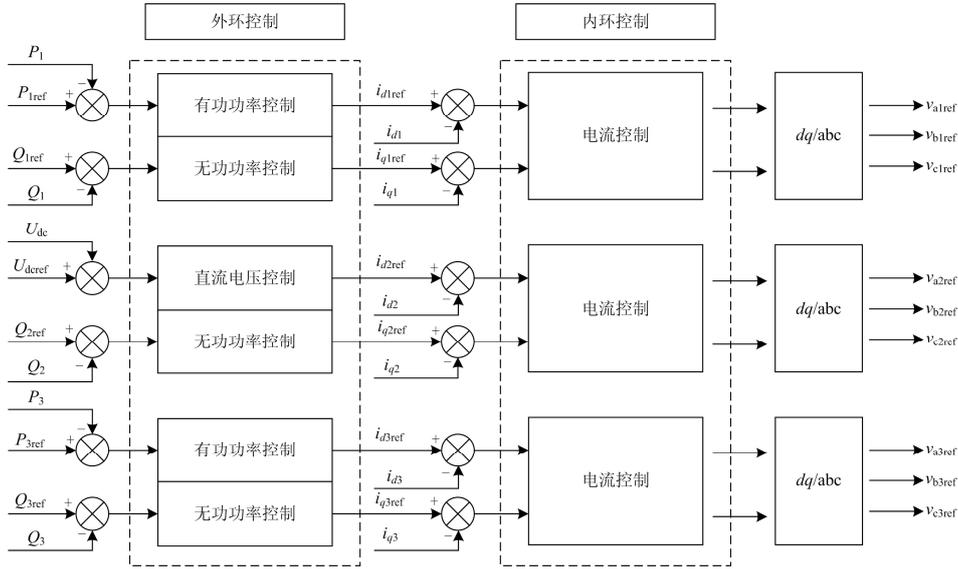


图3 三端口 FMSS 双闭环控制系统

Fig. 3 Double closed-loop control system of three-port FMSS

由图 4 可知, 稳态有功潮流转移指令 P_{ref} 和稳态无功潮流转移指令 Q_{ref} 分别为被控量的参考输入。

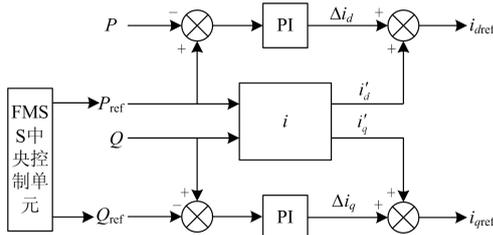


图4 功率控制原理结构

Fig. 4 Diagram of power control principle structure

图中, P_{ref} 由配电管理系统(DMS)或者 FMSS 中央控制单元根据三侧馈线负载均衡度优化计算获得, Q_{ref} 由 FMSS 中央控制单元根据节点电压偏离规定值之和优化计算获得, Q_{ref} 的具体计算方法见下节。

通过稳态逆模型和估值 i_d' 、 i_q' 的引入得到的输出电流参考值 i_{dref} 、 i_{qref} , 能够有效消除静态误差, 减小 PI 调节的超调现象, 实现有功功率和无功功率的精确控制。

2.2.2 直流电压与交流电压的控制

可直接通过 PI 控制器转换直流电压误差和 VSC 交流侧线电压有效值得到 d 轴和 q 轴电流分量参考值:

$$\begin{cases} i_{dref} = (k_{dP} + \frac{k_{dI}}{s})(U_{dc} - U_{dc}) \\ i_{qref} = (k_{qP} + \frac{k_{qI}}{s})(E_{rmsref} - E_{rms}) \end{cases} \quad (5)$$

由图 3 和式(5)可知, 使用 FMSS 可以控制直流电压恒定, 同时, 当 FMSS 用于调节交流电压时, 能够跟踪交流给定电压, 根据负荷侧的需求增发无功功率, 平缓调节交流电压有效值, 满足用户的电压质量要求, 实现配电网母线电压波动平抑。

2.3 内环控制

由式(1)一式(3)可知, $d-q$ 轴电流除受控制量 m_{d1} 、 m_{q1} 影响外, 还受耦合电压分量 ωLi_{d1} 、 ωLi_{q1} 和网侧电压 E_{d1} 、 E_{q1} 的影响。为实现 $d-q$ 轴电流的解耦控制, 同时消除电网电压的扰动影响, 在控制量中引入电流反馈和电压前馈补偿:

$$\begin{cases} m_{d1} U_{dc} = -k_{Pd1}(i_{d1ref} - i_{d1}) - k_{Id1} \int (i_{d1ref} - i_{d1}) dt + \omega Li_{q1} + E_{d1} \\ m_{q1} U_{dc} = -k_{Pq1}(i_{q1ref} - i_{q1}) - k_{Iq1} \int (i_{q1ref} - i_{q1}) dt - \omega Li_{d1} + E_{q1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_{d1ref} 、 i_{q1ref} 分别为 VSC1 侧有功电流 i_{d1} 、无功电流 i_{q1} 的参考值; k_{Pd1} 和 k_{Pq1} 、 k_{Id1} 和 k_{Iq1} 为电流 PI 调节器参数。

3 无功协调控制数学模型

三端口 FMSS 接入配网系统时, 需要协调控制电网馈线间功率潮流流动以及负载补偿。在满足电力需求以及保证供电可靠性前提下, 充分依靠无功功率来降低网络损耗, 提高系统运行经济性, 或者协调控制无功功率, 保证系统运行安全性^[20-21]。

3.1 优化目标函数

与负载连接的馈线 PCC 点是末端电压控制的关键点, 其电压质量是配电网末端电压安全运行的保证, 因此建立以节点电压偏离规定值之和最小为目标函数的 FMSS 接入配电网系统优化模型。

$$\min f = \sum_{i=1}^n \frac{|U_i - U_i^{\text{sp}}|}{\Delta U_i^{\text{sp}}} \quad (7)$$

式中: n 为节点数; U_i 为节点 i 的电压幅值; U_i^{sp} 为节点 i 的给定电压值; ΔU_i^{sp} 是给定的节点电压的最大偏移量。

3.2 约束条件

三端口 FMSS 接入配电网优化模型中, 除了目标函数外, 还需要有式(8)约束条件。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ P_i = P_{gi} - P_{li} + P_{si} \\ P_{s1} + P_{s2} + P_{s3} = 0 \\ P_{si}^2 + Q_{ci}^2 \leq S^2 \\ P_{si \min} \leq P_{si} \leq P_{si \max} \\ Q_{ci \min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci \max} \\ U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \\ I_{l \min} \leq I_l \leq I_{l \max} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: P_i 、 Q_i 、 V_i 、 G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点注入有功功率、无功功率、节点 i 电压、节点 i 和 j 间电导和功角; P_{gi} 、 P_{li} 、 S 分别为发电机有功出力、负载有功功率、开关容量; $P_{si \max}$ 、 $P_{si \min}$ 为开关注入节点有功功率的上限、下限; $Q_{ci \max}$ 、 $Q_{ci \min}$ 为开关无功功率补偿容量的上限、下限; $U_{i \max}$ 、 $U_{i \min}$ 为节点电压幅值的上限、下限; $I_{l \max}$ 和 $I_{l \min}$ 为流过馈线支路电流的上限、下限。

4 模型验证与动态响应分析

相对于输电系统, 配电系统中负载特性变化较大, 环境参数的改变对开关的控制效果有很大的影响, 因此本文仅研究由负荷波动而引起的配电网电压波动。基于上述分析, 建立 Matlab/Simulink 仿真模型, 分析 FMSS 的动态功率特性和电压波动治理性能。设计一个三端口 FMSS 配电系统如图 1 所示, 假定三侧交流系统均处于三相平衡稳态下, 选取仿真模型的系统及 FMSS 的详细参数如表 1 所示。

表 1 FMSS 仿真模型参数

Table 1 Model parameters of FMSS

| 参数 | 数值 |
|------------------------------|-------|
| 直流母线电压 U_{dc}/kV | 30 |
| 滤波电感 L/mH | 6 |
| 滤波电感寄生电阻 R/Ω | 0.02 |
| 直流侧电容 $C/\mu\text{F}$ | 1 000 |
| 开关频率 f_s/kHz | 10 |
| 开关额定电流 I_N/A | 350 |
| 三相交流侧相电压 U_{rms}/kV | 11 |
| 三相交流侧电压频率 f/Hz | 50 |
| 额定视在功率 S/MVA | 6 |

4.1 动态功率调控特性

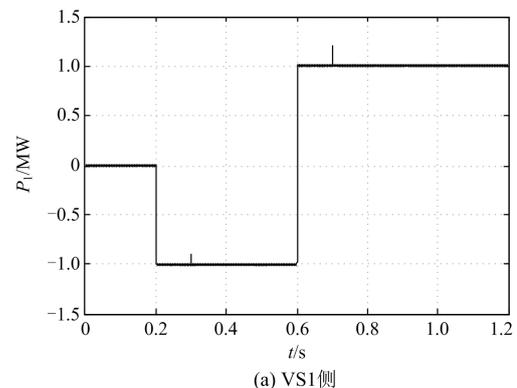
系统仿真设置为 VSC1、VSC2 侧 P/Q 控制、VSC3 侧 U_{dc}/Q 控制。具体测试流程安排如表 2 所示, 为了更好地检测系统的抗负载扰动能力, 使用在实际运行中较少出现的有功功率传输反向进行测试。

表 2 测试流程安排

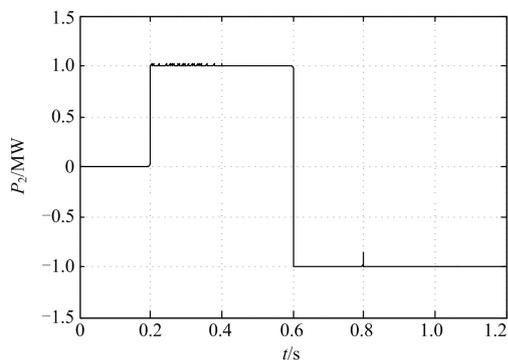
Table 2 Test process arrangement

| t/s | P_1/MW | P_2/MW | Q_1/Mvar | Q_2/Mvar | Q_3/Mvar |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0.3 | -1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0.4 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0.5 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.6 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.7 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 0.8 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 |
| 0.9 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |

由图 5—图 7 可见, 有功功率与无功功率均能准确跟踪外部指令, 具有良好的动态响应性能, 既保证了快速响应性能, 又使直流侧电压波动较小。无功功率跃变引发的直流电压瞬时波动相比有功功率传输跃变较小, 即实现了有功、无功功率的解耦控制。



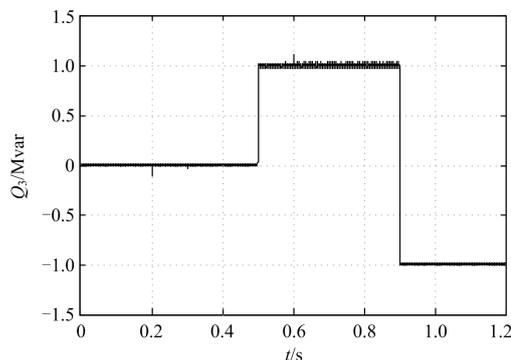
(a) VS1侧



(b) VSC2侧

图 5 有功功率响应波形

Fig. 5 Waveform of active power



(c) VSC3侧

图 7 无功功率响应波形

Fig. 7 Waveform of reactive power

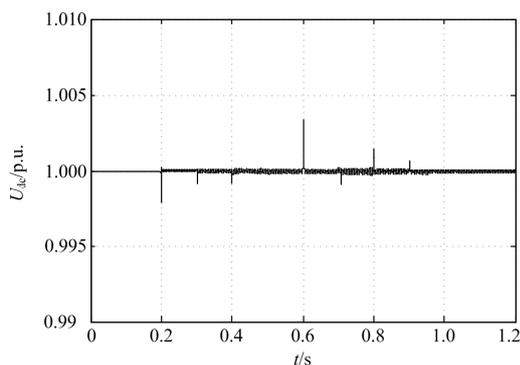
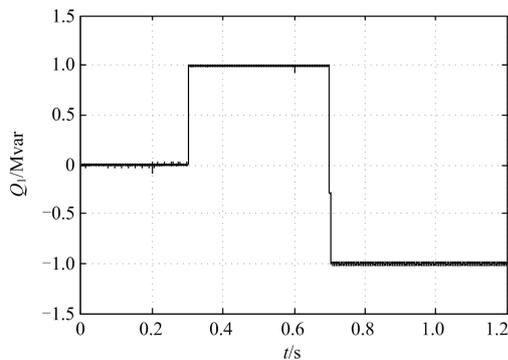
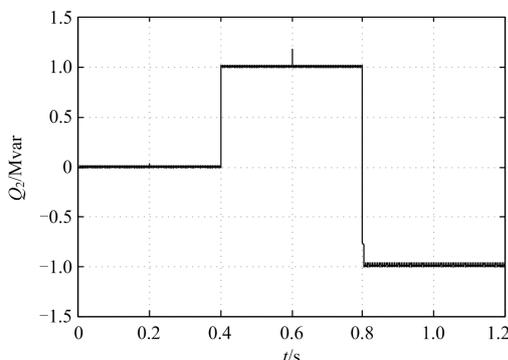


图 6 直流电压波形

Fig. 6 Waveform of DC voltage



(a) VSC1侧



(b) VSC2侧

4.2 电压波动治理性能

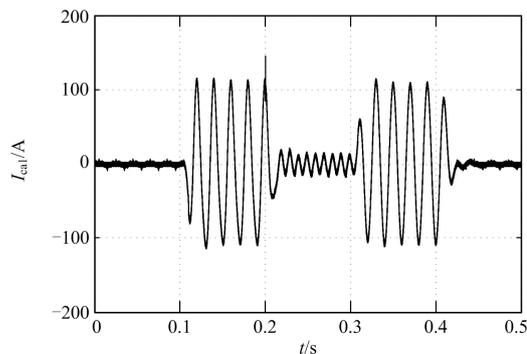
配电网的实际应用中, FMSS 不仅能够有效调节馈线负载率, 改善馈线间负荷平衡, 而且可以补偿负载无功, 维持公共连接点 PCC 电压稳定, 提高系统电压的稳定性, 改善系统的稳态性能和动态性能。在国际中, 对于中压配电网系统随机性不规则波动, 电压波动限值为 2%^[22-23]。

4.2.1 负载切换引起 PCC 点电压波动

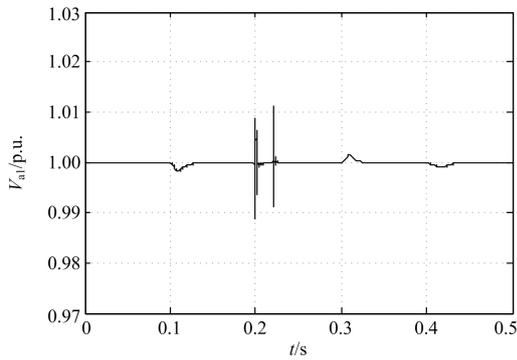
在图 1 的仿真模型中, 模拟普通居民用户负荷, 保持馈线 II、III 空载, 馈线 I 处设置感性负载、容性负载各 1 Mvar, 0.1 s 时切入感性负载, 0.2 s 切入容性负载, 0.3 s 切除感性负载, 0.4 s 切除容性负载。

图 8 为 FMSS 治理负载切换工况时的仿真波形图。由图 8(a)可得, 当负载切换引起 PCC 点发生电压波动时, FMSS 能够迅速进行功率调节, 通过控制交流侧电流来调整补偿无功输出, 以稳定 PCC 点电压波动。

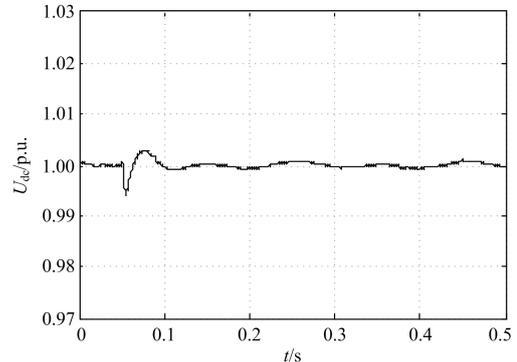
由图 8(b)、图 8(c)可见, PCC 点电压保持稳定, 仅在负载切换瞬间发生较小波动, 直流侧电压波形在整个切换过程中平稳有序, 幅值保持在 1 p.u., 受电压波动干扰影响非常小, 反映了配电网 PCC 点电压得到较好的无功补偿和调节, FMSS 有效抑制了由负载切换引起的电压波动, 保证了居民负荷的用电质量。



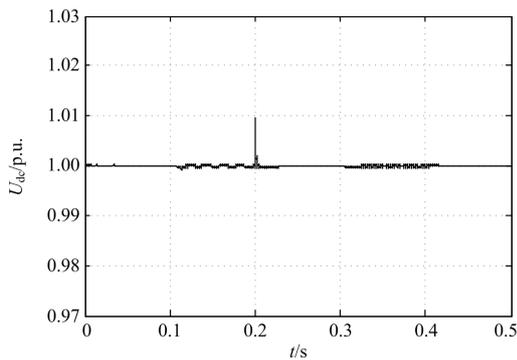
(a) FMSS 补偿电流波形



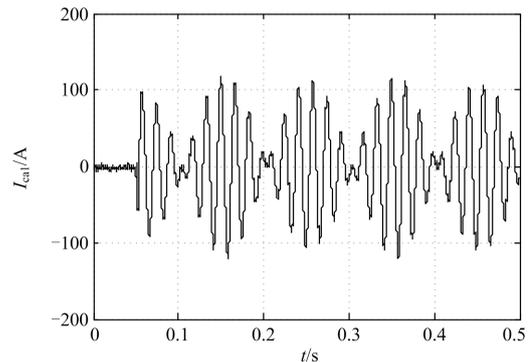
(b) PCC点电压波形



(b) 直流侧电压波形



(c) 直流侧电压波形



(c) FMSS补偿电流波形

图 8 负载切换仿真结果

Fig. 8 Simulation result of load switching

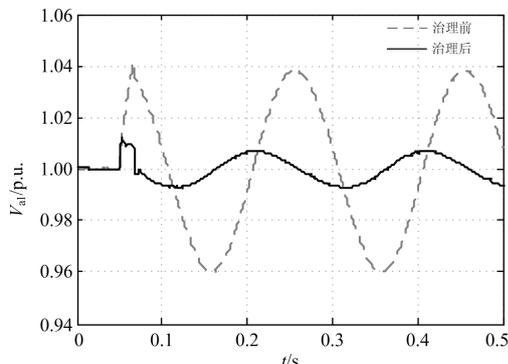
图 9 负载周期性波动工况仿真结果

Fig. 9 Simulation results of load periodic fluctuation

4.2.2 负载周期性波动引起 PCC 点电压周期性波动

配电网的用户负荷构成中，感性、容性负荷为一种常见理想情况，对电网影响较小，而由工厂负荷的电弧炉、轧机等波动性负荷接入电网引起的周期性电压波动，将对系统电能质量产生更恶劣的影响。基于图 1 的仿真模型，保持馈线 I、II 空载，馈线 III 接入 0.5 MW 的固定负载及一个可变负载，使 PCC 点电压产生幅度为 0.04 p.u. 的周期性波动，0.05 s 时接入可变负载。

如图 9 所示，在保持直流侧电压恒定的同时，



(a) VSC1 侧电压幅值波形

经过约 20 ms 的动态调整过程，电压波动幅度减小到 0.01 p.u. 以下，降幅大于 75%。由此可见 FMSS 无功调节效果显著，可以控制电压波动精确度在可容许范围，很好地抑制了电压波动，达到了稳定电网电压的目的，保证了工厂负荷的用电质量。

4.3 无功电压协调控制

维持电压在额定电压值是保证电力系统安全平稳运行的关键，无功功率的平衡决定了电力系统的电压运行水平。如图 10，建立 IEEE14 节点测试系统，由于长馈线末端电压通常为区域网络最低值，为更大限度地抑制系统的电压波动水平，选择将 FMSS 安置于节点 7、节点 9 与节点 14 之间，在 GAMS 平台进行无功优化。

协调控制的无功优化就是寻求一组使 f 取最小值的动作方式。基于电力系统具有非线性特点，本文采用非线性求解器(DNLP)进行求解。算例系统拓扑结构如图 10 所示，节点 1 是电源点，节点 3 和 4 分别带有各自的负荷。建立目标函数为式(7)、约束条件为式(8)的数学模型。系统中各母线电压运行范围设定为 [0.98 p.u., 1.02 p.u.]。

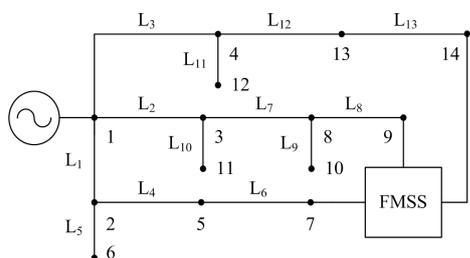


图 10 IEEE14 节点系统图

Fig. 10 Diagram of IEEE 14-node

图 11 为优化前后节点电压分布情况, 目标函数优化值 $f = 0.15$ 。由图 11 可以看出, 通过对系统无功优化进行补偿, 除去电源点电压以外, 节点的电压偏差明显降低, 最大电压偏差由 1.6%降低到 0.2%, 其波动得到很好地平抑。证明 FMSS 能够有效地改善网络的电压分布水平, 同时还可根据要求提供所需的无功补偿, 为电压质量要求较高的用户负荷供电。

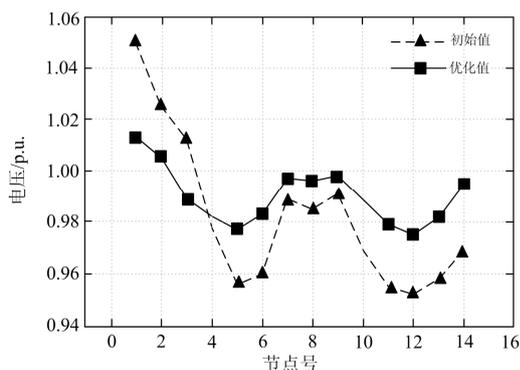


图 11 网络电压分布水平对比

Fig. 11 Comparison of voltage distribution level

5 结论

本文详细介绍了连接多条配电网馈线的 FMSS 的双闭环控制策略, 并通过对 FMSS 在电能质量治理中应用的仿真和优化得到以下结论:

1) 验证了 FMSS 代替联络开关连接多条馈线的可行性和优越性。FMSS 可以有效调节配电网的潮流分配, 具有很好的动态响应能力。

2) 当馈线有负荷发生变动时, 无论是普通居民负荷切换还是更恶劣的工厂负荷周期性波动, FMSS 几乎都可以进行补偿, 抑制母线电压波动, 保证用户电能质量, 同时避免系统受到大的干扰, 保持稳定运行。

3) 引入无功电压协调控制, 通过掌握 FMSS 无功需求的供给信息进行节点电压优化, 保证系统可靠性, 同时提高系统安全性。

配电网馈线末端使用 FMSS 代替联络开关接入, 对当前电网系统的工程实践具有一定的参考意义。此外, 本文工作尚存在一些不足之处, 如 FMSS 在三相不平衡、谐波污染等方面的电能质量治理性能, 有待进一步扩充研究。

参考文献

- [1] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 38-41, 55.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Smart grid from the perspective of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-41, 55.
- [2] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1-6.
LIU Wei, PENG Dong, BU Guangquan, et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 1-6.
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [4] 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.
- [5] 高志远, 曹阳, 徐昊亮, 等. 电力系统关键技术发展论刍议[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 14-17.
GAO Zhiyuan, CAO Yang, XU Haoliang, et al. Primary discussion on the key technologies development of power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 14-17.
- [6] 刘健, 芮骏, 张志华, 等. 智能接地配电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 130-134.
LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Smart grounding power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 130-134.
- [7] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, RI, USA: 1-8.
- [8] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing photovoltaic

- penetration with local energy storage and soft normally-open points[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-28, 2011, Detroit, MI, USA: 1-8.
- [9] BLOEMINK J M, GREEN T C. Benefits of distribution-level power electronics for supporting distributed generation growth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 911-919.
- [10] CAO W, WU J, JENKINS N. Feeder load balancing in MV distribution networks using soft normally-open points[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, October 12-15, 2014, Istanbul, Turkey: 1-6.
- [11] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [12] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析和控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-154.
FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-154.
- [13] 陆海强, 王金跃, 钱进. 模块化限流式统一潮流控制器的改进调制与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 136-142.
LU Haiqiang, WANG Jinyue, QIAN Jin. Modified modulation and control strategy of unified power flow controller based on modular multilevel converters with solid state fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 136-142.
- [14] MATHUR R M, VARMA R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] 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.
- [16] 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): 123-129, 137.
ZHANG Guorong, PENG Bo, XIE Runsheng, et al. Predictive synergy control strategy for flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 123-129, 137.
- [17] 董旭柱, 刘志文, 李鹏, 等. 基于多端柔性多状态开关的智能配电网调控技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 86-92.
- DONG Xuzhu, LIU Zhiwen, LI Peng, et al. Intelligent distribution network control technology based on multi-terminal flexible distribution switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 86-92.
- [18] 雷邦军. 针对 FACTS 设备的电力系统非线性控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
LEI Bangjun. Research on nonlinear control for power system installed with FACTS[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [19] 张碧琰. 多变量非线性系统的逆方法解耦控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
ZHANG Biyan. Research on the decoupling control for multivariable nonlinear systems use inverse method[J]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [20] 刘双, 张建周, 王汉林, 等. 考虑多无功源的光伏电站两阶段无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 120-125.
LIU Shuang, ZHANG Jianzhou, WANG Hanlin, et al. Distribution network reconfiguration method considering loop closing constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 120-125.
- [21] 王振浩, 葛津铭, 李国庆, 等. 改善风电场群并网地区电压稳定的无功协调控制的研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 983-990.
WANG Zhenhao, GE Jinming, LI Guoqing, et al. Research of reactive power coordinated control to improve voltage stability in on-grid region of clustered wind farms[J]. Acta Energetica Sinica, 2017, 38(4): 983-990.
- [22] 何学农. 现代电能质量测量技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [23] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5073-5079.
LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5073-5079.

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-07-11

作者简介:

张国荣(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电能质量控制技术、电力电子变换技术; E-mail: zhanggrcao@163.com

马晓芳(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制技术; E-mail: 846985752@qq.com

彭勃(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子变换技术. E-mail: pengbo1991@126.com

(编辑 葛艳娜)