

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2008014

一种新的配电网柔性多状态开关研究

李明

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学),湖北武汉430074)

摘要: 基于电力电子技术的柔性多状态开关(flexible multi-states switch, FMSS)装置可以实现配电网馈线间的柔性互联,灵活地控制馈线间的潮流,能够有效解决配电网内馈线有功功率失衡问题。在传统的柔性多状态开关基础上,提出了一种新的基于磁通控制型可调电抗器的配电网 FMSS 拓扑。首先,对磁通控制型可调电抗器的原理进行介绍;其次,对可控电抗在配电网馈线间潮流控制的原理进行了分析;再次,提出了柔性多状态开关装置不同接入方式下的控制策略;然后,搭建 Matlab 仿真模型,根据不同工况下的仿真结果验证了所提控制策略的有效性;最后,搭建了原理样机实验平台。实验结果显示,基于磁通控制型可调电抗器的配电网 FMSS 装置可以实现配电网馈线间的柔性互联,能够实现馈线间负载均衡。

关键词: 配电网; 柔性多状态开关(FMSS); 可调电抗器; 有功潮流; 柔性互联

中图分类号: TM 712 文献标志码: A

Research on a New Flexible Multi-States Switch for Distribution Network

LI Ming

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Flexible multi-states switch(FMSS) based on power electronics technology can realize the flexible interconnection between feeders, elastically control feeder power flow and solve the serious unbalance of feeder power flow in the distribution network. Based on the traditional flexible multi-state switch, this paper proposed that using flux-controlled variable reactor as the topology of flexible multi-states switch in distribution network. Firstly, flux-controlled variable reactor's principle was introduced; Then, we analyzed the principle of feeder power flow's control using variable reactor; After that, the control strategy for the flexible multi-states switch with different access methods was proposed; At last, a Matlab simulation model and the prototype experiment platform were built. The results verified the power flow control function of flexible multi-states switch and effectiveness of proposed controlled strategy.

KEY WORDS: distribution network; flexible multi-states switch(FMSS); variable reactor; active power flow; flexible interconnection

0 引言

传统配电网“闭环设计、开环运行”的特点以及分布式新能源的不断渗透、用户负荷的多样化等现

实问题,使得配电网双向潮流、馈线负荷不均衡、电压越限等问题日益突出。基于电力电子技术的配电网柔性多状态开关(flexible multi-states switch, FMSS)作为可在配电网中部分代替传统联络开关的新型柔性一次设备,已逐渐成为主动配电网研究领域的热点^[1]。

FMSS 可以定义为配电网馈线间的电力电子变换器。国内外学者提出了多种柔性互联概念:2007年日本电力工业中央研究院提出环网平衡控制器,

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

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0903100); State Grid Corporation of China Research Program (521104170043)

可以实现所联馈线间的负载均衡以及改善线路的电压分布^[2];2007年荷兰埃因霍温理工大学提出智能节点(intelligent node, IN)概念,利用背靠背电压源型变换器连接多条馈线,实现系统潮流的优化^[3];2010年英国帝国理工学院提出软开关(soft normally open point, SNOP)概念以部分替代配电网中的联络开关,使得配电网在不增加短路电流的基础上实现馈线间的潮流共济^[4],后续还分析了各种 SNOP 拓扑对提高新能源渗透率的作用;2011年台湾国立中山大学提出的环网功率控制器概念,实质是通过多条馈线互联,将配电网辐射状结构变为环网结构,以提高配电网的综合性能;北京交通大学研究了 SNOP 在配电网中的优化配置和运行优化,双闭环控制及其在配电网中的应用^[5];中科院电工所提出基于两电平背靠背电压源型变换器的多功能复合控制策略,实现配电网两条馈线潮流控制和无功补偿功能^[6]。

在众多的 FMSS 拓扑中,基于串联阻抗型 FACTS 的拓扑^[7],如可控硅投切型串联电容器(thyristor switched series capacitor, TSSC)^[8],可控硅控制型串联电容器(thyristor controlled series capacitor, TCSC)^[9]以及可关断晶闸管控制型串联电容器(GTO controlled series capacitor, GCSC)^[10],由于其成本及损耗较低的特点,适用于小容量有功功率调节场合,但也存在调控范围较小,产生谐波污染等问题^[11]。

目前,国内外在 FMSS 应用于配电网方面已经开展了一系列研究工作^[12-15],但对于装置的拓扑、原理分析、相应控制方法以及实际工程应用都还需要进一步研究。本文在传统的阻抗型 FACTS 的基础上,基于磁通控制型可调电抗器,提出一种新型配电网 FMSS 装置拓扑,分析其工作原理,提出对应的控制策略,并进行软件仿真和实验验证。

1 系统建模分析

1.1 磁通控制型可调电抗器原理分析

图 1 为磁通控制型可调电抗器(flux controlled adjustable reactor, FMFC)的结构图,其由铁心带气隙的双绕组特制电抗器、逆变器及控制系统组成,电抗器的工作绕组 AX 串接在系统中。图 2 为可调电抗器的 T 型等效电路。其中,工作绕组的漏阻抗为 Z_1 ;控制绕组折算到工作绕组侧的漏阻抗为 Z'_2 ;

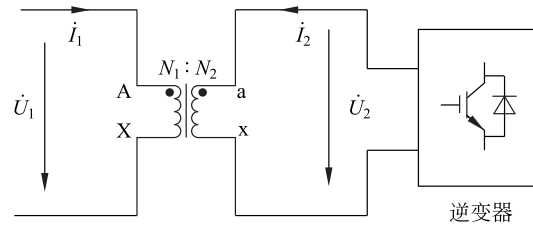


图 1 磁通控制型可调电抗器结构图

Fig. 1 Structure of variable reactor with FMFC

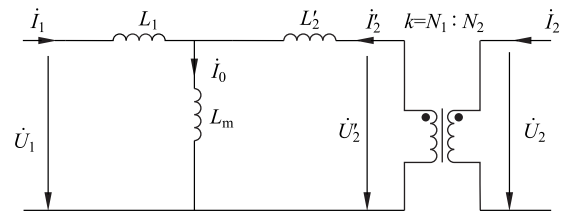


图 2 电抗器 T 型等效电路

Fig. 2 T-type equivalent circuit of variable reactor

电抗器的励磁阻抗为 Z_m 。为了后续分析方便,我们令特制电抗器工作绕组与控制绕组匝数比 k 为 1。由 T 型等效电路可以得到:

$$\begin{cases} u_1 = Z_1 i_1 + Z_m i_0 = Z_1 i_1 + Z_m (i_1 + i_2') \\ u_2' = Z_2' i_2' + Z_m i_0 = Z_2' i_2' + Z_m (i_1 + i_2') \end{cases} \quad (1)$$

通过控制逆变器的输出,令 $i_2' = \alpha i_1$,代入上式可得特制电抗器工作绕组等效阻抗值为

$$Z_{AX} = u_1 / i_1 = Z_1 + (1 + \alpha) Z_m \quad (2)$$

由于电抗器的励磁阻抗通常远大于工作绕组的漏阻抗,因此在忽略电抗器工作绕组漏阻抗条件下,电抗器工作绕组 AX 对外呈现的等效阻抗值与控制系数 α 线性相关,通过改变系数的大小,就可以实现对电抗器阻抗值的动态、连续调节,这就是磁通控制型可调电抗器的基本原理。

1.2 接入方式分析

将 FMSS 装置部署在馈线的不同位置,可以起到不同的作用,同时也对应不同的控制方式。其中,部署在馈线首端通过并联方式互联,主要是用于变电站互联和紧急功率支援;部署在馈线末端直接连接 2 条馈线,则主要用于均衡馈线间负荷、提高分布式新能源渗透以及重要负荷供电;串联在 1 条馈线首端并且馈线末端合环连接,主要用于负荷馈线间负荷均衡和解决电能质量问题;部署在分布式新能源接入点与另一馈线末端互联,则主要用于分布式新能源的消纳。附录图 A1—A4 为 FMSS 装置 4 类不同接入方式的示意图。

1.3 FMSS 装置的功率潮流控制原理

在配电网功率潮流控制中,我们主要关注有功

功率潮流的控制,无功功率通常采用就地补偿的方式控制,因此本文的分析将基于配电网馈线间的有功潮流控制,并分别利用含 FMSS 装置的馈线等效电路、矢量图及功率方程展开分析。

图 3 为含并联 FMSS 装置的馈线等效电路及矢量图。两馈线电压源矢量分别为 $E_1 \angle \delta_1'$ 和 $E_2 \angle \delta_2'$; 线路阻抗分别为 $Z_1' \angle \theta_1'$ 和 $Z_2' \angle \theta_2'$; 馈线等效负载分别为 $Z_1 \angle \theta_1$ 和 $Z_2 \angle \theta_2$; 装置与馈线连接处电压分别为 $U_1 \angle \delta_1$ 和 $U_2 \angle \delta_2$; 可调电抗器的等效阻抗为 $Z_{AX} = Z \angle \delta$; 上方馈线线路电流为 I_1' , 负载流过电流为 I_1 ; 下方馈线线路电流为 I_2' , 负载流过电流为 I_2 ; FMSS 装置流过电流为 I_0 。

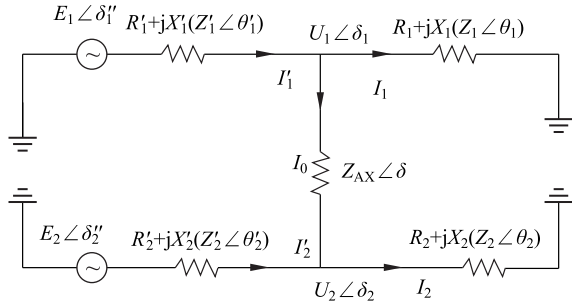


图 3 含并联 FMSS 装置的馈线等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of feeder with parallel FMSS

由基尔霍夫电流定律可知:

$$I_0 = \frac{U_1 \angle \delta_1 - U_2 \angle \delta_2}{Z \angle \delta} = \frac{U_1}{Z} \angle (\delta_1 - \delta) - \frac{U_2}{Z} \angle (\delta_2 - \delta) \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{U_1 \angle \delta_1}{Z_1 \angle \theta_1} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{U_2 \angle \delta_2}{Z_2 \angle \theta_2} \quad (5)$$

$$I_1' = I_0 + I_1 = \frac{U_1}{Z_1} \angle (\delta_1 - \theta_1) + \frac{U_1}{Z} \angle (\delta_1 - \delta) - \frac{U_1}{Z} \angle (\delta_2 - \delta) \quad (6)$$

从而可以得到,上方馈线向连接点注入的有功功率为

$$P_{U_1} = \text{Re}(U_1 \angle \delta_1 \cdot I_1') = \frac{U_1^2}{Z_1} \cos \theta_1 + \frac{U_1^2}{Z} \cos \delta - \frac{U_1 U_2}{Z} \cos(\delta_1 + \delta - \delta_2) \quad (7)$$

而上方馈线负载消耗有功功率为

$$P_{Z_1} = \text{Re}(U_1 \angle \delta_1 \cdot I_1) = \frac{U_1^2}{Z_1} \cos \theta_1 \quad (8)$$

电抗器消耗有功功率为

$$P_{Z_{AX}} = \text{Re}[(U_1 \angle \delta_1 - U_2 \angle \delta_2) \cdot I] = \frac{U_1^2}{Z} \cos \delta - \frac{U_1 U_2}{Z} \cos(\delta_1 + \delta - \delta_2) - \frac{U_1 U_2}{Z} \cos(\delta_1 - \delta - \delta_2) + \frac{U_2^2}{Z} \cos \delta \quad (9)$$

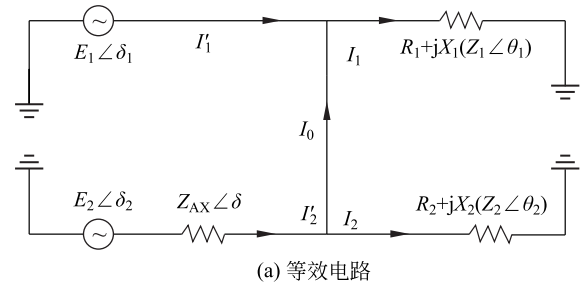
因此馈线间经 FMSS 装置传输的有功功率为

$$P_{tr} = P_{U_1} - P_{Z_1} - P_{Z_{AX}} = \frac{U_1 U_2}{Z} \cos(\delta_1 - \delta - \delta_2) - \frac{U_2^2}{Z} \cos \delta = \frac{U_2}{Z} [U_1 \cos(\delta_1 - \delta - \delta_2) - U_2 \cos \delta] \quad (10)$$

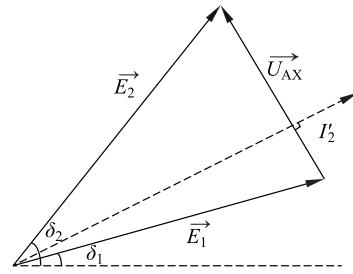
若忽略可调电抗器等效阻抗中的阻性部分,将等效阻抗视作纯感抗,即 δ 为 90° 时,则经 FMSS 装置传输的有功功率为

$$P_{tr} = \frac{U_1 U_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)}{Z} \quad (11)$$

图 4 为下方馈线首端串联 FMSS 装置,馈线末端之间直接互联时的馈线等效电路图及矢量图。



(a) 等效电路



(b) 矢量图

图 4 含串联 FMSS 装置的馈线等效电路及矢量图

Fig. 4 Equivalent circuit of feeder with serial FMSS and vector

同理可知,经 FMSS 装置传输的有功功率为

$$P_{tr} = \frac{E_1 E_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)}{Z} \quad (12)$$

假设下方馈线负载的有功负荷为

$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z_2} \cos \theta_2 \quad (13)$$

则两馈线间的有功功率潮流为

$$P = P_{tr} - P_2 = \frac{E_1 E_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)}{Z} - P_2 \quad (14)$$

综合上述分析可知,无论是将可调电抗器串联或是并联布置在配电网馈线间,通过实时改变可调电抗器工作绕组的等效阻抗值,都可以动态、连续地改变馈线间的有功潮流,从而实现馈线间的柔性互联。

2 控制策略

配电网馈线间潮流连续调控的目的在于缓解重载馈线供电变压器压力,充分挖掘轻载馈线供电变压器潜力,避免分布式新能源的波动性以及电动汽车等冲击性负荷对配电系统的影响,减缓配电网的线路改造速度,改善配电网的经济性和稳定性。稳态运行条件下,通过改变可调电抗器工作绕组等效阻抗值就可以调节两馈线间的有功功率传输。稳态运行下的有功潮流转移的指令由配电网的调度中心根据馈线负载均衡度、系统电压分布、线路损耗等综合因素给出,FMSS装置根据潮流转移指令进行相应控制。针对串联型和并联型的装置,本文提出的电压电流双闭环控制策略如图5所示。

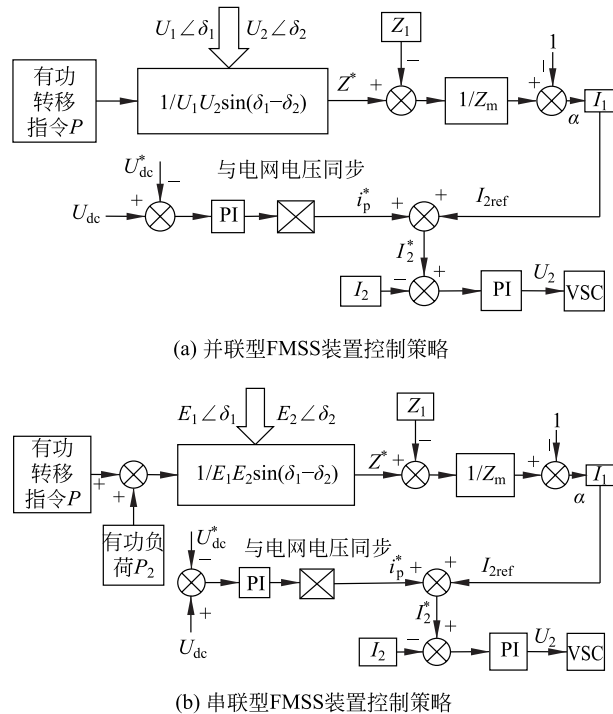


图5 并联FMSS装置控制策略和串联型FMSS装置控制策略

Fig. 5 Control strategy for parallel FMSS and serial FMSS

其中,电压环的控制目标是保持直流侧电压恒定,电流环进行电流跟踪控制。逆变器输出电流的

指令值 I_2^* 由两部分组成,一部分 I_{2ref} 与电抗器工作绕组流过的基波电流 i_{2ref} 相对应,以实现电抗值的调节和有功潮流的控制,电抗控制系数 α 则根据潮流调控目标计算得到;另一部分 i_p^* 是直流侧电压指令值 U_{dc}^* 与反馈值 U_{dc} 的差值经PI调节后再结合电网电压锁相所得相位得到,从而通过控制逆变器对有功分量的吸收和发出,维持直流侧电压的恒定。

电压环通过对逆变器直流侧电压进行PI控制求出逆变器电流输出指令值的有功分量:

$$i_p^* = \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) (U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (15)$$

然后通过电抗器工作绕组两端电压 U_1 相位 θ , 将 i_p^* 与 U_1 同步得到 i_{p-ref} :

$$i_{p-ref} = i_p^* \angle \theta \quad (16)$$

再叠加上电抗值调节电流 i_{2ref} , 作为电流内环的跟踪目标 i_2^* :

$$i_2^* = i_{p-ref} + i_{2ref} \quad (17)$$

通过内环控制得到逆变器输出的基波调制电压 U_2 , 对调制电压的基波分量进行控制,使逆变器实际输出电流快速、准确跟踪外环给定参考值。

$$u_2 = \left(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) (i_2^* - i_2) \quad (18)$$

3 仿真实验

本文在 Matlab 仿真软件中搭建了基于可调电抗器的 FMSS 仿真模型,以验证有功潮流控制的正确性。定义上方馈线为电网1,下方馈线为电网2,电网1在0到0.5s空载运行,0.5s后有功负荷始终为10kW,电网2初始时刻到0.5s有功负荷为10kW,0.5s到1s有功负荷为20kW,1s后有功负荷为30kW。配电网柔性多状态开关装置0.5s时投入使用。上下方电源有功功率输出如图6所示。从仿真波形可以看到,在馈线负荷发生波动的情况下,通过FMSS装置的迅速调节,可以保持电网1和电网2的有功负荷均衡。

4 实验验证

为了验证提出的FMSS拓扑的正确性和控制策略的有效性,搭建了FMSS原理样机实验平台。系统分别利用可调电抗器并联在馈线间和可调电

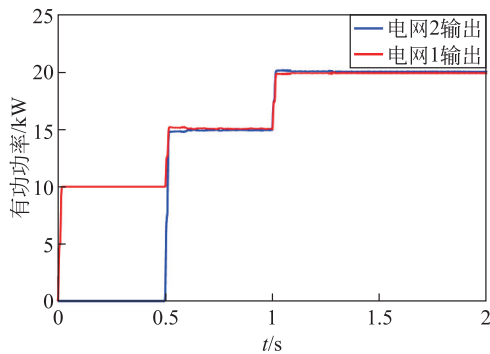


图6 潮流控制仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of power flow control

抗器串联在一条馈线首端,馈线末端直接互联2种方案进行两馈线互联。装置参数如表1所示。

表1 实验参数

Table 1 Experiment parameters

参数	数值
电源电压/kV	7.5
电源频率/Hz	50
特制电抗器工作绕组与控制绕组匝比	1
特制电抗器工作绕组侧漏电感/mH	0.17
特制电抗器励磁电感/mH	8.4
电网1负载/ Ω	2
电网2负载/ Ω	4
逆变器开关频率/kHz	10
逆变器直流侧电压/V	15
逆变器输出滤波电感/mH	1

为了简化控制,特制电抗器的工作绕组与控制绕组匝比 k 选为1。实验平台分别采用第2节所提的控制策略进行实验验证。逆变器开关频率为10 kHz,实验过程中直流侧电压控制在15 V左右以保证逆变过程的稳定。电网1和电网2的负载分别为 $2\ \Omega$ 与 $4\ \Omega$ 的电阻,以模拟不同馈线的轻载与重载情况,为验证FMSS装置的潮流控制功能提供一定的负载不均衡度。

图7为可调电抗器并联在馈线间的实验波形。其中, A_2 和 A_1 分别为电网1和电网2负载电流波形,而 A_4 和 A_3 分别是电网1和电网2馈线电流波形。波形右侧为各电流的有效值。从实验波形及有效值可以看出,在电网1负载为电网2负载2倍的条件下,通过并联在电网1和电网2之间的FMSS装置的潮流调控作用,使得电网1和电网2的馈线电流基本保持均衡。具体实验结果如表2所示。

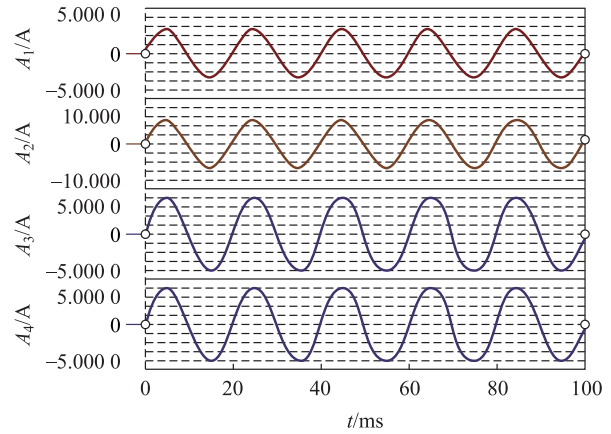


图7 并联FMSS装置实验波形

Fig. 7 Experiment waveforms of parallel FMSS

表2 实验结果

Table 2 Experiment results

电流/A	并联FMSS装置	串联FMSS装置
A_1	1.810 1	1.907
A_2	3.705 2	3.813
A_3	2.710 6	2.895
A_4	2.795 7	2.904

图8为可调电抗器串联在电网2首端,末端直接互联条件下的实验波形。其中, A_2 和 A_1 分别为电网1和电网2负载电流波形,而 A_4 和 A_3 分别为电网1和电网2馈线电流实验波形。波形右侧为各电流的有效值。从实验波形及有效值可以看出,在电网1负载为电网2负载2倍的条件下,通过串联在电网2首端的FMSS装置的潮流调控作用,同样可以保证电网1和电网2的馈线电流基本均衡。

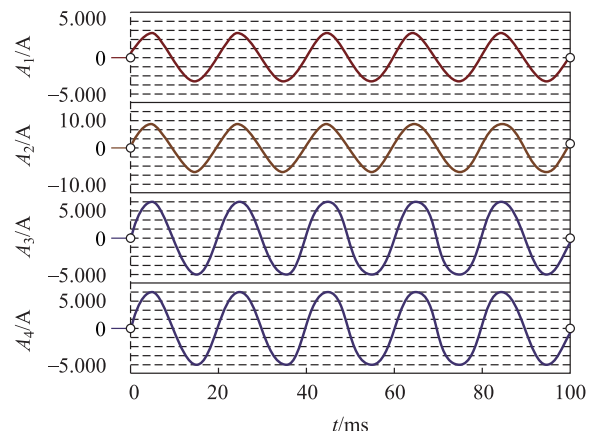


图8 串联FMSS装置实验波形

Fig. 8 Experiment waveforms of serial FMSS

5 结语

随着配电网的不断发展,配电网馈线负载均衡

问题日益严峻,已有研究表明在主动配电网中,FMSS装置作为关键设备,可以实现多条馈线间的功率潮流调控能力。通过调节配电网馈线间负载均衡度,可以有效平衡重载和轻载馈线上游变压器的压力,减少线路损耗,改善系统电压分布以及满足分布式新能源的消纳和电动汽车等冲击性负荷对配电网的影响,综合提升配电网运行的安全性和经济性。

本文提出的基于磁通控制型可调电抗器的FMSS装置,对于配电网稳态下的有功潮流控制具有较好的效果。下一步计划开展利用FMSS进行配电网故障情况下的负载转供、故障隔离以及电能质量治理等研究。

参考文献

- [1] 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. Flexible interconnection technology and Prospect of intelligent distribution network based on intelligent soft switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [2] OKADA N, TAKASAKI M, SAKAI H, et al. Development of a 6.6 kV-1 MVA transformerless loop balance controller[C]//International Conference on Power Electronics Specialists. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1087-1091.
- [3] de GRAAFF R A A, MYRZIK J M A, KLING W L, et al. Intelligent nodes in distribution systems-optimizing steady state settings[C]//2007 IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007: 391-395.
- [4] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C]//IEEE PES General Meeting. Providence, RI, USA, 2010: 1-8.
- [5] 王岸. 柔性多状态开关的研究及其在配电网中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
WANG An. Research on flexible multi state switch and its application in distribution network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [6] 霍群海, 栗梦涵, 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(07): 166-170.
HUO Qunhai, SU Menghan, WU Lixin, et al. Novel composite control strategy for flexible multi state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (7): 166-170.
- [7] YAN P, SEKAR A. Analysis of radial distribution systems with embedded series FACTS devices using a fast line flow-based algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1775-1782.
- [8] PENG F Z. Flexible AC transmission systems (FACTS) and resilient AC distribution systems (RACDS) in smart grid[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11): 2099-2115.
- [9] REN Y J. Comprehensive research of applying TCSC to improve the property of distribution network[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [10] WATANABE E, SOUZA L, JESUS F, et al. GCSC-gate controlled series capacitor: A new FACTS device for series compensation of transmission lines [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Latin America: IEEE, 2004.
- [11] 周剑桥, 张建文, 施刚, 等. 应用于配电网柔性互联的变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 277-288, 342.
ZHOU Jianqiao, ZHANG Jianwen, SHI Gang, et al. Converter topology for flexible interconnection of distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 277-288, 342.
- [12] 晏阳, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于潮流介数的柔性多状态开关配置及主动配电系统优化[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 92-98.
YAN Yang, LIAO Qingfen, LIU Dachen, et al. Flexible multi state switch configuration and active distribution system optimization based on power flow betweenness [J]. China Southern Power Grid technology, 2015, 9(11): 92-98
- [13] 赵金利, 李雨薇, 李鹏, 等. 基于二阶锥规划的有源配电网柔性多状态开关电压无功时序控制方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2134-2141.
ZHAO Jinli, LI Yuwei, LI Peng, et al. Flexible multi state switching voltage and reactive power sequence control method for active distribution network based on second order cone programming [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2134-2141.
- [14] LI Zhicheng, WU Jianzhong, HE Jinghan, et al. Dual closed-loop control of soft normally open points and its application in distribution networks[J]. Smart Grid, 2013, 1(1): 49-55.
- [15] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2315-2321.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. An optimization method for operation sequence of distribution network with interconnection switch and intelligent soft switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (9): 2315-2321.

收稿日期: 2020-08-31

作者简介:

李明(1998),男,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用,2016908246@qq.com。



李明

附录 A

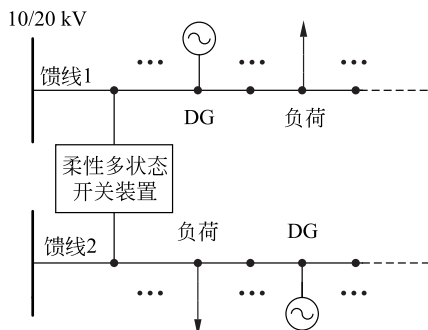


图 A1 FMSS 装置并联接入馈线首端示意图

Fig. A1 Schematic diagram of FMSS device connected to feeder head in parallel

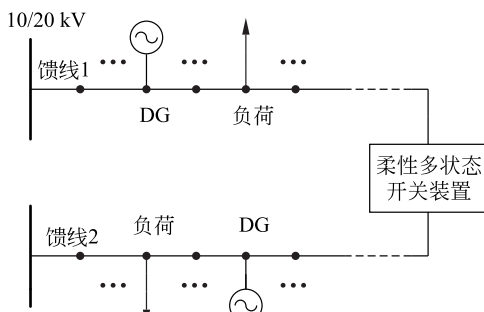


图 A2 FMSS 装置并联接入馈线末端示意图

Fig. A2 Schematic diagram of FMSS device connected to feeder end in parallel

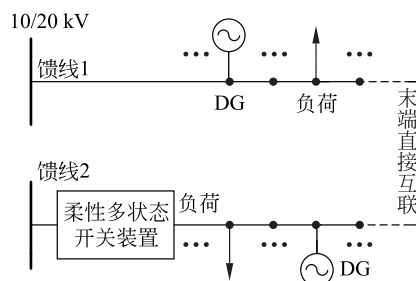


图 A3 FMSS 装置串联接入下方馈线, 馈线间末端直接互联示意图

Fig. A3 Schematic diagram of FMSS connected in series to the lower feeder and direct interconnection at the ends of feeders

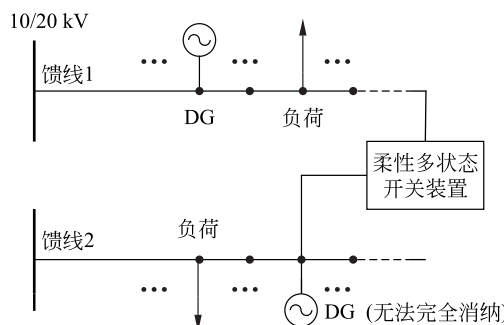


图 A4 FMSS 装置并联接入下方馈线新能源接入点与另一馈线间末端示意图

Fig. A4 Schematic diagram of FMSS device connected in parallel to the end between new energy access point of lower feeder and another feeder