

可控高压电抗器对四川电网的影响分析

刘柏私 余锐 张宇栋 汤凡

(国家电网公司西南分部,四川成都 610041)

摘要:可控高压电抗器是重要的无功补偿装置,这里从川电外送能力、局部水电送出能力、系统故障恢复能力以及稳态电压调节能力4个方面研究了可控高压电抗器对四川电网的影响,具有一定的实际意义。

关键词:可控高压电抗器;外送能力;特高压;稳定极限

Abstract: The controllable high-voltage reactor is an important equipment of reactive compensation. The influence of controllable high-voltage reactors on Sichuan power grid is analyzed in terms of transmission capability from Sichuan power grid, local hydropower transmission capability, recovery capability after fault and voltage regulation capability of steady state, which is of actual significance.

Key words: controllable high-voltage reactors; transmission capability; ultra-high voltage; stability limit

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0043-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.009

0 引言

全国电力系统正在形成大型的互联电网,使得电网结构日益复杂,安全稳定运行任务艰巨。四川电网地处中国西南,其水电资源丰富,而用电负荷相对较少。在这种能源格局的背景下,四川电网更多地担负的是大功率、远距离的输电任务。四川电网作为能源基地,大容量远距离输电的送端,其暂态稳定、动态稳定、特高压输电及大电网安全等问题依然突出,提高系统外送稳定性将是首要目的。

FACTS技术作为“现代电力系统中三项具有变革性的前沿技术”之一^[1],是增强输配电系统可控性和灵活性、提高运行稳定性和经济性的重要手段^[2]。特别是处于电力技术前沿的高压可控并联电抗器,可实现无功功率的快速补偿和调节。在系统主要站点安装可控高压电抗器,除抑制潜供电流、限制工频过电压等功能外^[3],还可以发挥以下作用^[4-7]:

- 1) 适应丰枯期潮流变化,提高电压调控能力;
- 2) 提升电网运行电压,降低输电损耗;
- 3) 减少低压无功补偿装置操作,降低维护运行成本;
- 4) 动态电压调控,改善电网动态恢复特性;
- 5) 提升输电线路输送功率,增强系统阻尼,抑

制功率振荡。

因此,立足于可控高压电抗器的无功功率的调节特性,分别从川电外送能力、局部水电送出能力、系统故障恢复能力以及稳态电压调节能力4个方面研究了可控高压电抗器对四川电网的影响,通过仿真分析对比了具体的安装配置方案,为坚强四川电网积累了一定经验。

1 可控高压电抗器简介

目前,超高压长线路基本采用的是固定电抗器,其在限制过电压的同时,又限制了系统调节电压的能力,需要配置相应容量的电容来满足系统调压需求。可控高压电抗器的出现有效地解决了限制过电压与无功补偿的矛盾。在系统潮流发生变化时,可以根据调压需求自动投入相应容量的电抗器,并且在发生暂态过程时,它可以实现无功功率的快速补偿和调节,提高系统暂态稳定性,同时对系统的振荡也有一定的抑制作用,可以提高系统的动态稳定能力^[8]。

可控并联电抗器按照工作原理的不同,可以分为3类:磁控式可控并联电抗器、晶闸管控制变压器(thyristor controlled transformer, TCT)型可控并联电抗器和分级式可控并联电抗器^[9-12]。其各自优缺点如下:

1) 磁控式可控并联电抗器的主要优点是可实现输出容量连续、平滑调节;缺点是响应速度较慢,且本体运行时有谐波,需要加装滤波器。

2) TCT式可控并联电抗器的优点是容量可以连续调节,响应速度快;缺点是晶闸管阀长时工作,需要增加水冷系统,损耗增加,维护工作量大,可靠性低,脉动方式谐波量大,需要加装滤波器。

3) 分级式可控并联电抗器的优点是原理简单,响应速度快,谐波小,无需滤波器,晶闸管阀采用自冷方式,可靠性高;缺点是容量不能连续调节,应用于超/特高压输电系统时,考虑到成本等因素,其分级容量不宜设置过多。

考虑到TCT式可控并联电抗器具有连续调节和响应速度快的特点,下面以TCT式可控高压电抗器为例,研究可控高压电抗器对四川电网的影响。

2 可控高压电抗器对四川电网的影响

以四川电网2016年丰大数据为基础,从川电外送能力、局部水电送出能力、系统故障恢复能力以及稳态电压调节能力4个方面研究了可控高压电抗器对四川电网的影响。

2.1 川电外送能力

四川电网的外送能力受区域间功率交换、网架建设、暂态动态稳定等多方限制。在电网网架和区域间功率交换值相对固定时,川电外送能力主要受暂态稳定限制。

仿真时将固定高压电抗器更换为可控高压电抗器,容量与固定高压电抗器保持一致,由于固定高压电抗器在四川电网广泛分布于多个站点,并且可控高抗价格较高,不能对所有站点进行配置,因此存在可控高压电抗器的优化配置问题。

鉴于蜀州变电站是川西水电外送的汇集站,同时也是成都环网的连接站,其枢纽地位较为突出,潮流穿越较大;洪沟变电站是四川交流外送通道的出口站,也是川南东纵通道的电气重点,其在稳态运行与直流闭锁后均承载较大的转移功率,其枢纽地位同样十分突出;南充变电站也是重要的枢纽变电站,站内相关设备停电,将严重影响川西-川南断面和川渝断面输送能力。因此,在四川500 kV电网可控高压电抗器多点布置条件下,可优先考虑在蜀州、洪沟和南充变电站配置。

为考察可控高压电抗器安装对川电外送的提高能力,以川渝断面500 kV洪沟-板桥线路N-2故障为限制故障进行仿真研究,可得到川电外送极限如表1所示。

表1 可控高抗对外送能力的影响

配置方案	总容量/Mvar	川渝提高/MW	单位提高
蜀州	360	120	0.333
洪沟	492	150	0.305
南充	272	150	0.551

从表1中可以看出:1)配置可控高压电抗器对于川电外送能力的提高有一定作用,并且提高的程度对可控高压电抗器的安装地点比较敏感;2)相比蜀州和洪沟变电站,南充变电站安装可控高压电抗器的效果最好,单位提高超过了0.5,因此建议在南充安装可控高压电抗器来提高四川电网外送能力。

当川渝断面发生洪沟-板桥线路N-2故障时,部分潮流转移至黄岩-万县这2回线路,造成南充站电压过低,若在南充站安装可控高压电抗器,可以提供一定的无功补偿和电压支撑,提高四川电网暂态稳定性。

2.2 局部水电送出能力

四川九石雅、大普提水电外送通道稳定性较低,特别是西部电源并网超前于电网建设,水电弃水矛盾较为突出。以大普提水电通道的送出能力为例,讨论可控高压电抗器对于局部水电送出能力的影响。

图1和图2对比了普洪线N-1故障下,在无可控高压电抗器和洪沟配置可控高压电抗器时,二滩-三峡机组功角振荡曲线和晋长治特高压电压曲线。

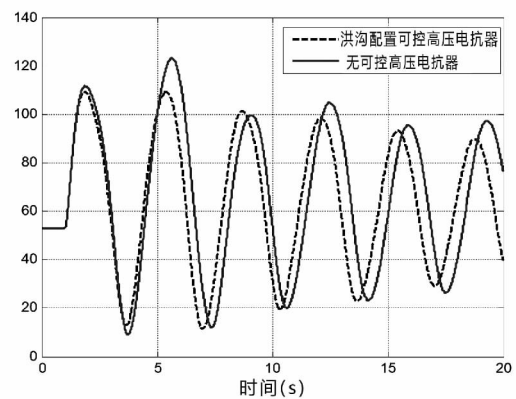


图1 二滩-三峡机组功角振荡曲线

由图1所示,相比没有可控高压电抗器的情况,

在洪沟站配置可控高压电抗器后,二滩机组功角振荡的振幅变小,并且衰减得更快。由图2所示,在洪沟站加装可控高压电抗器后,对晋长治特高压电压提升较为明显,对比电压跌落的最低点,电压提升近0.1 p.u.。以普洪线N-1故障为限制故障时,在洪沟站配置可控高压电抗器可以提高大普提断面功率约600 MW。

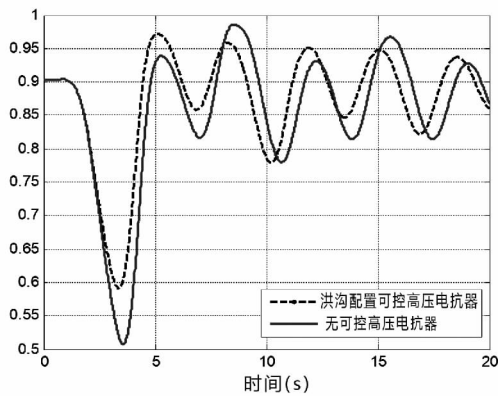


图2 晋长治特高压电压曲线

2.3 系统故障恢复能力

电力系统发生故障后,发电机功角和区域间联络线将出现振荡,变电站母线电压降低,这里以系统阻尼比和交流特高压无功电压支撑来描述系统故障后的恢复能力。

2.3.1 提高系统阻尼比

当系统发生南谭N-2故障时,图3给出了无可控高压电抗器和在南充站配置可控高压电抗器时,洪板线的功率振荡曲线。可以看出,南充站配置可控高压电抗器后,洪板线功率振荡幅度变小,衰减速度变快。

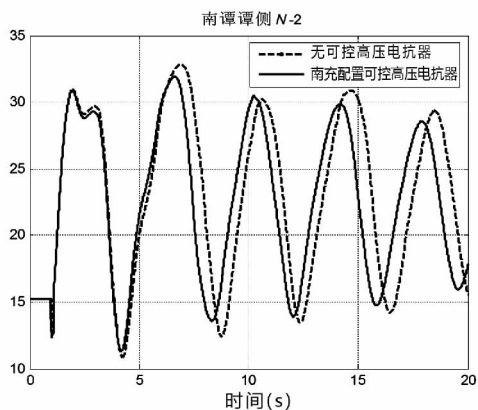


图3 洪板线功率振荡曲线

为考察可控高压电抗器的配置地点对系统阻尼比的影响,依次在蜀州、洪沟、南充、东坡变电站配置可控高压电抗器,得到计算结果如表2所示。

表2 可控高压电抗器对系统阻尼比的影响

配置方案	总容量/Mvar	阻尼比	单位提高/($\times 10^{-5}$)
无	-	0.010	-
蜀州	360	0.020	2.8
洪沟	492	0.022	2.4
南充	272	0.018	2.9
东坡	656	0.028	2.7

从表2可以看出,在单一站点安装可控高压电抗器可以比较明显地增强系统的阻尼,各站配置可控高压电抗器的效果差别不太明显。相比较而言,在成都环网和川西断面上配置可控高压电抗器的效果较好。

2.3.2 提高特高压电压

同样当系统发生南谭N-2故障后,依次在蜀州、洪沟、南充、东坡变电站配置可控高压电抗器。在仿真中,可控高压电抗器的容量仅作动态电压支撑,不参与稳态调压。得到的结果如表3和图3所示。

表3 可控高压电抗器对特高压电压的影响

配置方案	总容量/Mvar	特高压电压最低降落/(p.u.)	单位提高/($\times 10^{-4}$)
无	-	0.49	-
蜀州	360	0.59	2.7
洪沟	492	0.65	3.2
南充	272	0.56	2.6
东坡	656	0.69	3.0

从仿真结果可以看出:1)系统若不配置可控高压电抗器,则南谭N-2故障可能引起特高压母线电压大幅降落,并接近特高压解列的临界值;2)在东坡站、洪沟站安装可控高压电抗器的效果最好,并且安装的容量越大,特高压电压提升得越为明显。

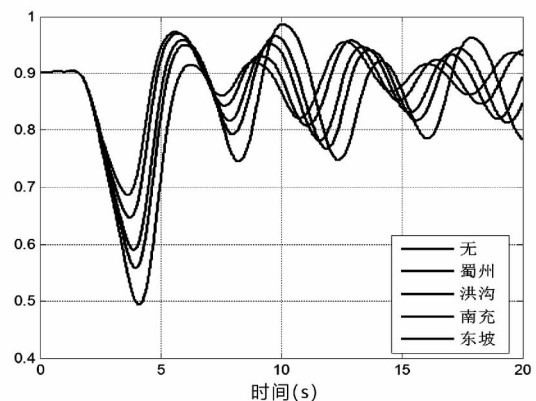


图4 特高压长治站母线电压

2.4 稳态电压调节能力

与固定高压电抗器不同,可控高压电抗器可根据不同运行方式下电网电压的波动,动态调节感性

补偿容量,可以增强电网电压调控的灵活性,提升重负荷水平下电网的电压水平,并降低输电网损耗。

针对蜀州、东坡、普提、洪沟4个变电站,考察如表4所示的单一与组合等不同可控高压电抗器配置方案对电网稳态电压和网损的影响。

表4 四川500 kV主干网架高压电抗器配置方案
单位: MW

配置方案	蜀州	东坡	普提	洪沟
方案1	180	-	-	-
方案2	360	-	-	-
方案3	-	150	-	-
方案4	-	300	-	-
方案5	-	-	180	-
方案6	-	-	360	-
方案7	-	-	-	180
方案8	-	-	-	360
方案9	180	-	180	-
方案10	360	-	360	-
方案11	180	180	180	180
方案12	360	300	360	360

通过退出可控高压电抗器提升输电网电压水平和降低网络损耗,其计算结果如表5所示。从中可以看出:蜀州站配置180 Mvar或360 Mvar的可控高压电抗器,可将成都环网电压各节点电压分别提升

表5 不同可控高压电抗器配置对电网电压及网损的影响评估

配置方案	提升电压/kV										降低网损 /MW
	蜀州	谭家湾	桃乡	普提	月城	东坡	叙府	泸州	黄岩	洪沟	
方案1	3.7	2.4	2.7	0.6	0.4	1.7	0.8	0.9	1.0	1.3	6.94
方案2	7.8	5.1	5.6	1.3	0.8	3.6	1.7	1.9	2.1	2.6	13.48
方案3	1.4	1.2	1.7	0.7	0.4	2.4	0.9	0.9	0.6	1.2	5.12
方案4	2.8	2.4	3.4	1.3	0.9	4.8	1.8	1.8	1.2	2.3	10.01
方案5	0.6	0.6	0.8	2.9	1.2	0.8	0.8	0.9	0.5	1.2	4.84
方案6	1.1	1.1	1.5	5.7	2.3	1.6	1.5	1.7	0.8	2.3	8.98
方案7	1.2	1.2	1.5	1.2	0.6	1.3	1.4	2.0	1.0	3.3	6.25
方案8	2.3	2.2	2.9	2.0	1.1	2.5	2.5	3.5	2.0	6.3	10.82
方案9	4.4	3.0	3.5	3.5	1.6	2.5	1.6	1.8	1.5	2.5	11.70
方案10	9.2	6.4	7.3	6.9	3.1	5.3	3.3	3.6	3.0	5.0	22.75
方案11	7.1	5.6	6.8	5.2	2.6	6.3	3.6	4.3	3.1	6.7	21.68
方案12	16.0	12.7	15.1	11.0	5.2	13.7	8.0	9.3	6.9	14.2	45.96

2.4~3.7 kV和5.1~7.8 kV,降低网损7~13.5 MW;组合配置方案下,蜀州、普提变电站各配置360 Mvar的可控高压电抗器与蜀州、普提、东坡、洪沟变电站各配置180 Mvar的可控高压电抗器在降低网损方面的效益基本相当;若4个变电站各配置360 Mvar的可控高压电抗器,最大可降低网损46 MW。

在普提、洪沟变电站均配置等容量的可控高压电抗器条件下,洪沟站的配置对成都环网电压提升效果更显著,降低网损功率水平也更大。

综合各站点配置可控高压电抗器对成都环网负荷中心电压水平影响和降低网损的幅度,可优先考虑在蜀州和洪沟两个变电站配置可控高压电抗器。

3 结 论

可控高压电抗器在四川电网具有较好的适用性:1)可以提高电网交流外送能力,改善局部水电送出能力;2)系统发生故障后,可以提高母线电压水平,增强系统阻尼;3)可以提升电网电压调控能力,提高电压运行水平降低网络损耗。若考虑外送能力,在南充变电站配置可控高压电抗器效果较好,若综合考虑电压的稳态和动态提升、降低网络损耗,可在洪沟变电站配置可控高压电抗器。

参考文献

[1] 韩英铎,林孔兴. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术、智能控制、基于GPS的新一代动态安全稳定分析与监测系[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(7): 1-6.

[2] 曹一家,陶佳,王光增,等. FACTS 控制器间交互影响及协调控制研究进展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 1-8.

[3] 郑彬,班连庚,宋瑞华,等. 750 kV 可控高抗应用中需注意的问题及对策[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 88-92.

[4] 周腊吾,朱英浩,周之光. 特高压可控并联电抗器的调节范围[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 116-119.

[5] 周勤勇,郭强,卜广全,等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 电网技术, 2007, 27(7): 1-7.

[6] 王轩,邓占锋,于坤山. 超高压磁控式并联电抗器稳态

特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 104-109.

[7] 周沛洪,何慧雯,戴敏,等. 可控高抗在1 000 kV 交流紧凑型输电线路中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1832-1842.

[8] 蒋大鹏. 适用于特高压的可控电抗器建模与仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.

[9] 刘洪恩. 可控并联电抗器及其在特高压交流输电中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[10] 张建兴,王轩,雷晰,等. 可控电抗器综述[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 269-272.

[11] 邓占锋,王轩,周飞,等. 超高压磁控式并联电抗器仿真建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 108-113.

[12] 李仲青,周泽昕,杜丁香,等. 超/特高压高漏抗变压器式分级可控并联电抗器的动态模拟[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 6-10.

(收稿日期: 2017-04-10)

(上接第28页)

20 或者当前最优方案保持4次迭代不变或者相邻的方案都在禁忌表中,则将当前最优方案作为全局最优。具体的搜索结果见表5。

表5 禁忌搜索结果

迭代次数	当前最优方案重复次数	当前最优方案	最优目标函数值/万元
6	4	(0, 1, 1, 1)	2 906

根据表5中数据可以看出,经过禁忌搜索的结果为:同时采用更换变压器、安装无功补偿装置和安装三相平衡装置的规划方案,搜索的结果和直接比较目标函数的结果是一样的;并且算例结构也表明,使用禁忌搜索法可以减少优选过程的计算量,缩短时间,提高计算的效率。

6 结 语

针对配电网降损措施难以定量选择的问题,提出了一种城市中低压配电网降损决策的方法,有利于高效低碳的电网建设工作。所提出的配电网降损措施的决策模型,不但关注了降损措施带来的经济效益,并且兼顾了环境效益,计及了中低压配电网的

多个规划目标,对现在的配电网改造有一定的参考意义,具有很好的实用性。

参考文献

[1] 邵成成,王锡凡,王秀丽,等. 主动配电系统与主网的有功协调[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(11): 58-63.

[2] 魏春,韩民晓,杨霞. 低碳经济对电网负荷率特性的影响分析[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 100-104.

[3] 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): 125-135.

[4] 陈飞,刘东,陈云辉. 主动配电网电压分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 61-67.

[5] 万东,张忠会. 基于可靠性的配电网用户停电损失估算方法研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 8-11.

[6] 王彬宇. 城市中低压配电网损耗分析与降损技术选择方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[7] 韩学军,王晶浩,潘超,等. 综合补偿三相不平衡负载的研究[J]. 电网技术, 2006, 32: 288-291.

[8] 张五一,张言滨,刘华伟. 配电网三相负荷不对称的线损分析[J]. 继电器, 2007, 35(7): 24-27.

(收稿日期: 2017-03-27)