

提高山东电网安全稳定水平的无功补偿措施研究

利用BPA仿真工具,对“外电入鲁”后山东电网的电压稳定进行评估,在此基础上,针对调相机、SVC和STATCOM等三种动态无功补偿装置,从装置特性、提升电压稳定性、调节速度和技术经济性等不同角度进行选型研究,提出在临沂换流站500 kV侧加装 3×300 Mvar调相机作为推荐的配置措施。该研究对于增强山东电网接受外电的能力,保证山东电网的健康发展具有重要意义。

沙志成 刘 威 董 霜/山东电力工程咨询院有限公司

0 引言

随着国家对环境保护要求的不断提高,山东节能减排压力日益增大,环境保护问题逐渐成为制约山东经济社会又好又快发展的因素之一。为解决日益突出的大气污染问题,改善环境空气质量,保障公众环境权益,促进经济社会发展方式转变,山东省编制了《山东省2013~2020年大气污染防治规划》,分三期达到最终改善目标,此规划将积极推进“外电入鲁”作为调整能源结构的主要措施之一,至2020年,争取省外来电达到32 000 MW,积极接纳省外电力将成为今后山东电力发展的战略选择。

2015年,山东电网通过两个500 kV双回线路(辛安—聊城双回线路和黄骅—滨州双回线路)与华北电网联网,通过银川东—青岛换流站 ± 660 kV直流线路接受宁东电力。同年,山东电网高峰时段接受区外来电7 500 MW(其中,500 kV辛安—聊城双回、黄骅—滨州双回线路接受华北主网3 500 MW,银川东直接受区外来电4 000 MW),全年共

接受区外来电500.57亿kW·h。

结合《大气污染防治行动计划重点输电通道研究论证报告》和特高压相关输变电工程及各工程前期工作开展情况,为满足华北京津冀鲁地区负荷发展及蒙西、锡盟和榆横等地能源外送的需求,2017年华北区域内特高压电网将建成锡盟—北京东—天津南—济南双回、蒙西—晋北—北京西—天津南双回、榆横—晋中—石家庄—济南—潍坊双回以及蒙西—晋中双回送电通道。

山东电网将建成济南和潍坊两个特高压交流工程和上海庙—临沂特高压直流工程,山东电网接受区外来电27 500 MW,大约占全网最大负荷的30%,由于接入山东500 kV电网火电装机比例较少,缺少必要的有源动态无功电压支撑,电网安全稳定等问题进一步凸显。目前,在“外电入鲁”的特高压直流工程中对于不同动态无功补偿装置的选型研究在国内尚属首次,对于保证山东电网的健康发展具有重要意义。

1 山东电网安全稳定分析

1.1 计算条件

(1) 计算工具及计算水平年

采用中国电力科学研究院PSD电力系统软件工具(PSD Power Tools)的中国版潮流、短路和暂态稳定程序作为本次设计的研究工具,计算水平年选取2017年。

(2) 网架结构

山东电网通过济南特—天津南、济



沙志成/高级工程师

关键词/Keywords

无功补偿·
调相机·
电压稳定·

南特—石家庄交流1 000 kV线路和黄骅—滨州、辛安—聊城交流500 kV线路与华北主网相连，接受外电13 500 MW；通过±660 kV银川东—青岛和±800 kV上海庙—临沂直流线路分别接受外电4 000 MW和10 000 MW。

(3) 计算负荷、装机水平和区外来电

2017年山东电网统调负荷79 790 MW，接入500 kV电网火电装机共16 315 MW，占比27%，接入220 kV电网火电装机45 160 MW，占比73%，1 000 kV未直接接入电源。

(4) 发电机模型和负荷模型

华北电网均采用发电机详细模型，计及励磁调节系统、PSS和汽轮机调速系统动态特性；京津冀电网、蒙东电网和山西电网负荷模型均采用40%恒定阻抗，60%感应电动机模型；山东电网负荷模型均采用50%恒定阻抗，50%感应电动机模型。参考机组为天津盘山电厂。

1.2 安全稳定分析

(1) 大负荷方式

1 000 kV交流联络线石家庄特向济南特送电 $2 \times 1\,920$ MW，天津南特向济南特送电 $2 \times 2\,299$ MW，500 kV交流联络线黄骅向滨州送电 $2 \times 1\,432$ MW，辛安向聊城送电 $2 \times 1\,071$ MW。山东网内济南特降压5 375 MW，潍坊特降压4 113 MW，临沂特降压3 746 MW。济南特向潍坊特送电 $2 \times 1\,521$ MW，临沂特向潍坊特送电 2×539 MW，临沂换流站向临沂特送电 $2 \times 2\,413$ MW，网内无过负荷现象。

对山东电网1 000 kV交流联络线单回三永故障、对临沂换流站双极闭锁故障进行稳定计算，结果表明，山东网内无须切除负荷，系统保持稳定，如图1、图2所示。

(2) 小负荷方式

当考虑网内负荷为正常方式负荷的65%左右时，网内机组相应减出力，保证上海庙—山东（10 000 MW）、宁东直流（4 000 MW）满功率运行，1 000 kV特高压及500 kV交流联络通道受电12 400 MW。

该方式下，当1 000 kV天津南—济南等线路发

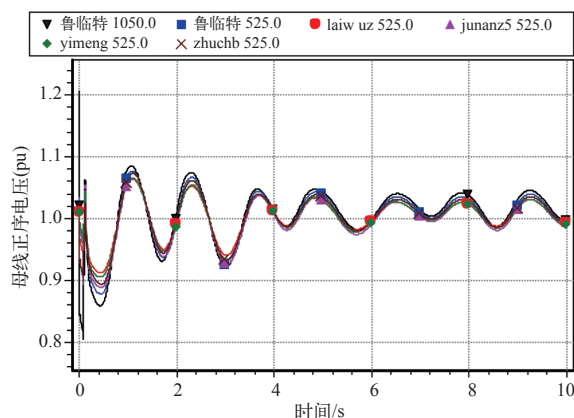


图1 天津南—济南1 000 kV单回三永故障电压曲线（大负荷方式）

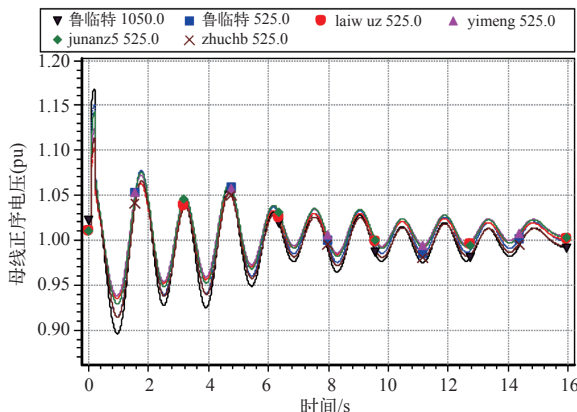


图2 上海庙直流双极闭锁故障电压曲线（大负荷方式）

生 $N-1$ 故障时，由于山东省内火电机组70%以上接入220 kV电网，500 kV和1 000 kV交流电网无功不足问题突出。直流功率持续振荡，山东电网整体电压崩溃，如图3所示。

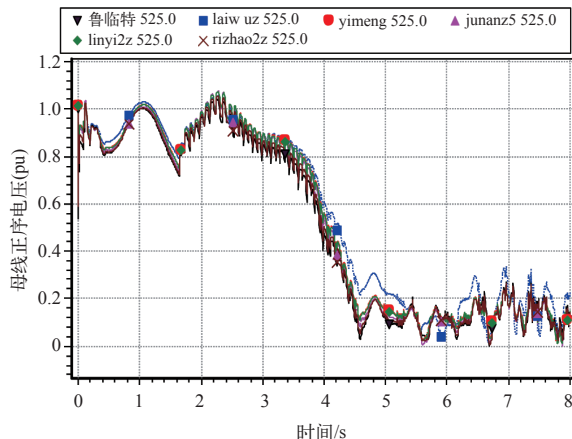


图3 天津南—济南1 000 kV单回三永故障电压曲线（小负荷方式）

2 提高电网稳定水平的并联动态无功措施

2.1 无功补偿装置

发电机是系统中分布最广、最好的动态无功补偿设备。调相机与发电机结构相同，在系统需要时向系统快速提供或吸收无功功率。在我国电网发展过程中，如省间联网初期，由于电压等级低、输电距离远（多采用220 kV线路远距离输电），系统功角和电压稳定问题突出，因此通过在受端电网配置调相机来提高系统稳定性。

国外从20世纪50年代开始，有多个国家应用调相机提高输电系统的稳定性。如瑞典、阿根廷、加拿大、埃及和巴西等国家在大规模水电基地远距离外送的受端变电站加装调相机。法国、日本电网早期使用调相机较多，随着电网网架加强和电源增加，法国调相机没有新的增加，而日本东京地区在1987年7月23日发生静态电压崩溃事故后（损失负荷8 170 MW），增加了抽水蓄能、调相机和SVC等动态无功补偿装置。随着电力电子技术的快速发展，静止无功补偿器（SVC）和静止同步补偿器（STATCOM）等动态无功补偿设备也逐步应用于电力系统。SVC技术成熟、经济性好，目前在国内外电网中应用较多。加拿大魁北克电网在负荷中心4个变电站分别安装两组300 Mvar的SVC装置；墨西哥在南部水电站外送400 kV线路受端变电站安装4组75 Mvar的SVC装置，以提高输电安全性。国网公司在辽宁鞍山，四川洪沟、桃乡，重庆板桥、万县，湖南紫霞，甘肃沙洲，西藏拉萨、夺底、曲哥和乃琼等地装有SVC，在西北等风电、光伏汇集站也有大量SVC应用。STATCOM在河南朝阳，上海西郊，广东东莞、木棉、北郊和水乡等变电站有20~200 Mvar装置投运，尚处于试点应用阶段^[1-5]。

2.2 动态无功补偿装置性能比较

(1) 调相机

调相机具有强励能力（不低于2倍），在1~2 s内无功出力可以达到其额定容量的2倍以上。与发电机励磁方式一样，主要有交流励磁机方式和自

并励磁方式，现代大型发电机多采用自并励磁方式，调节速度更快，调节容量更大。

常规的自并励磁调节器以控制机端电压为目标，近年来研发了以调相机主变压器高压侧电压为控制目标的自并励磁控制方式，可提高调相机对系统电压响应的灵敏度，加快无功调节速度和调节幅度。

(2) SVC构成及控制

SVC由传统的电容电抗组成，采用晶闸管控制电容和电抗器输出。SVC性价比好，响应速度快。可以通过晶闸管控制电抗器中的电流以及电容器投切，并控制无功输出大小。

(3) STATCOM构成及控制

STATCOM是基于电压源换流器的并联无功补偿装置，能够实时快速地调节输出无功功率。它利用新一代可关断大功率电力电子器件（如IGBT、GTO等）组成电压源换流器，将直流电压变换为交流电压，控制电力电子器件关断角实现对逆变器输出交流电压的控制，为系统提供容性或感性的注入电流。由于功率器件集成度高，因而STATCOM占地面积小，约为SVC的1/3^[6]。

2.3 整体比较

从设备的技术经济性比较来看，调相机建设用地和运行寿命分别是同容量SVC的1/3和3倍，在多直流馈入的受端电网加装调相机更具可实施性，而且其运行可靠性明显高于SVC等动态无功补偿装置；大容量STATCOM还处于技术开发完善阶段，且造价高、可靠性低，尚不具备大规模应用的条件。

调相机无功输出基本不受系统电压波动影响，且可以根据电网安全需要，自动快速调整无功出力，短时最大无功输出可达其额定容量的2倍以上，对提高送受端电网的电压稳定性和直流输电系统抵御故障的能力有明显作用，且优于SVC、STATCOM等动态无功补偿装置。通过对临沂换流站安装调相机，对STATCOM进行稳定计算和对比分析，可知临沂换流站需加装4台300 Mvar STATCOM才能和3台300 Mvar调相机稳定效果相

当，在造价方面大约需增加投资2.4亿元，因此，建议临沂换流站加装调相机。不同补偿方式下临沂换流站500 kV母线电压曲线如图4所示，动态无功补偿设备整体比较情况如下表所示。

3 临沂换流站加装调相机效果分析

(1) 降低直流换相失败的风险

当石家庄—济南1 000 kV线路发生三永N-1故障时，在临沂换流站500 kV侧加装3×300 Mvar调相机，降低了直流发生连续换相失败的风险，有助于直流功率的快速恢复和系统稳定。石家

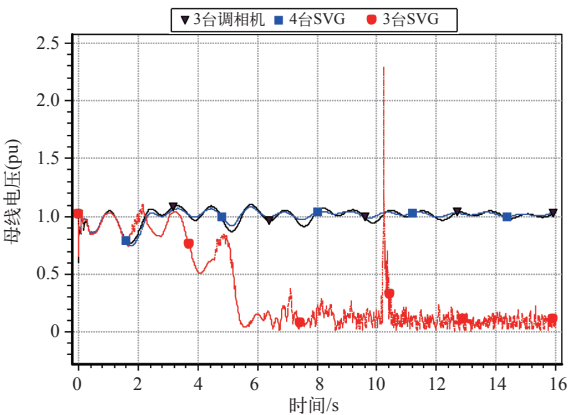


图4 不同补偿方式下临沂换流站500 kV母线电压曲线

表 动态无功补偿设备整体比较情况

项目	调相机	SVC	STATCOM
设备类型	旋转设备，向系统提供转动惯量和短路电流	静止设备	静止设备
无功特性	无功输出受系统电压影响小，具备短时强励能力（2倍过载），能进相运行	与电压二次方成正比，受系统电压影响大	基本与系统电压成正比，受系统电压影响较大
响应时间/ms	20	20~60	<10
调节速度	1~2 s达到峰值	40~100 ms达到第一峰值	40~100 ms达到第一峰值
有功损耗(%)	1.5	0.8	1
占地面积	约为同等容量SVC的1/3	较大	约为同等容量SVC的1/3
使用寿命/年	30	10	25
经济性	运维费用和损耗费用较高，导致经济性劣于SVC，但优于STATCOM	静态投资和运维、损耗费用均较低，经济性较好	静态投资高，经济性差

庄—济南1 000 kV单回三永故障直流功率曲线如图5所示。

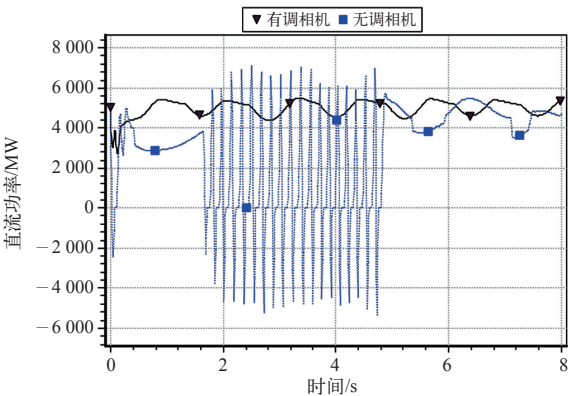


图5 石家庄—济南1 000 kV单回三永故障直流功率曲线

(2) 提高故障后电压恢复水平及速度

考虑上海庙—山东特高压直流双极闭锁故障，在临沂换流站500 kV侧加装3台3×300 Mvar调相机，大幅降低了故障后的电压波动幅度，有助于故障后系统电压的快速恢复。上海庙直流双

极闭锁故障母线电压曲线如图6所示。

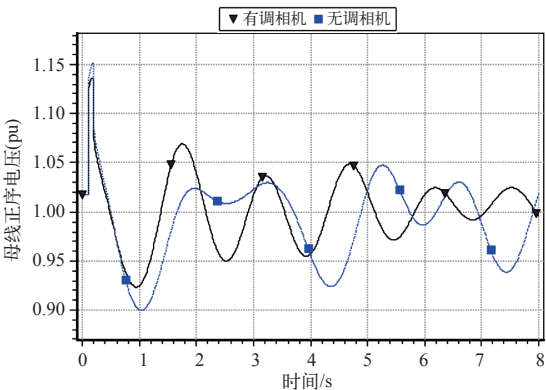


图6 上海庙直流双极闭锁故障母线电压曲线

(3) 提高短路容量和直流短路比

在临沂换流站500 kV侧加装3×300 Mvar调相机后，可有效提升换流站的系统短路容量和短路电流水平，同时提升了直流有效短路比（500 kV由6.7提高至7.5），受端交流系统对直流支撑能力增强。

（下转第41页）

- [8] Thomas J Overbye. A power flow measure for unsolvable cases [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (3) : 1359-1365.
- [9] Zhihong Feng, Venkataramana Ajjarapu, Dominic J Maratukulam. A practical minimum load shedding strategy to minigate voltage collapse [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (4) : 1285-1291.
- [10] Zhihong Feng, Venkataramana Ajjarapu, Dominic J Maratukulam. A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (2) : 791-797.
- [11] 王建全, 王伟胜. 电力系统最优切负荷算法 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (3) : 33-35.
- [12] 傅旭, 王锡凡. 静态安全分析中的联动切负荷算法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (9) : 82-86.
- [13] 曲鑫, 王小君, 和敬润. 基于Kruskal遗传混合算法的主动配电网规划策略 [J]. 电气应用, 2015, 34 (8) : 22-25.
- [14] 余庆媛, 沈沉, 乔颖, 等. 电力系统低压减载和低频减载协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2008 (23) : 23-26.
- [15] 马世英, 易俊, 孙华东, 等. 电力系统低压减载配置原则及方案 [J]. 电力系统自动化, 2009 (5) : 45-49.
- [16] 黄镔, 赵良, 马世英, 等. 基于PV曲线的低压减载配置方法 [J]. 电网技术, 2008 (23) : 29-34.
- [17] 马平, 蔡兴国, 于继来, 等. 基于最小不匹配函数的低压减载算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005 (1) : 27-31.
- [18] 刘斌, 陈磊, 闵勇. 考虑暂态电压稳定的低压减载地点选择 [J]. 电力系统自动化, 2008 (5) : 11-14.
- (收稿日期: 2016-01-22) **EA**

(上接第31页)

4 结束语

1) 随着“外电入鲁”特高压交、直流工程的逐步实施, 以及山东500 kV电网电压支撑薄弱的进一步凸显, 在未来的规划中, 应考虑加装必要的动态无功设备, 同时, 加强山东电网自身建设, 提高电网的稳定性, 可进一步增强山东电网接受外电的能力。

2) 调相机动态补偿效果要比SVC、STATCOM的补偿效果好, 调相机具备较强的双向调节能力, 在发生严重电压跌落故障时, 短时(1 s左右)动态无功最高输出接近额定容量的2倍, 为系统提供紧急无功电压支撑, 在系统动态过程中, 无功调节鲁棒性好。

3) 临沂换流站500 kV侧加装 3×300 Mvar调相机, 可为系统提供紧急无功电压支撑, 提高短路容量和直流短路比, 降低直流换相失败的风险, 提高故障后电压恢复水平及速度, 故障后系统保持稳定。

参考文献

- [1] 戴武昌, 陈东魁, 张威, 等. 大容量远距离交流输电系统无功平衡及稳态电压控制 [J]. 电网技术, 2013, 37 (4) : 1101-1105.
- [2] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC与STATCOM在大容量输电通道上的应用比较 [J]. 电力系统保护与控制, 2010 (24) : 77-81.
- [3] 翁利民, 靳建峰. SVC与STATCOM 的性能比较与应用分析 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 38 (4) : 1-4.
- [4] 李来福, 于继来, 柳焯. 戴维南等值参数的漂移问题研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (20) : 1-5.
- [5] 刘振亚. 中国电力与能源 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [6] 夏祖华, 沈斐, 胡爱军, 等. 动态无功补偿技术应用综述 [J]. 电力设备, 2004, 5 (10) : 27-31.

(收稿日期: 2016-02-24) **EA**