

大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析

郑海涛, 郑昕, 吴兴全, 姚天亮

(中国能源建设集团甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了研究并网风电场和光伏电站内应用全容量 SVG (Static Var Generator) 动态无功补偿的必要性和特别要求, 重点从调节特性与响应速度等性能指标对比研究了 SVC (Static Var Compensator) 和 SVG 两种型式的动态无功补偿装置。针对甘肃已并网多个新能源项目, 分析了大型风电场升压站在无功配置方案和无功补偿设备运行方面存在的误区和一些细节问题, 并结合典型事故进一步分析了电网故障情况下 SVG 对系统无功和电压的支撑作用。同时, 研究了集中并网光伏电站内 SVG 的选型和典型电气接线方案以及 SVG 在实际工程应用中的常见故障问题, 对类似工程具有指导意义。

关键词: 风电场; 光伏电站; SVC; SVG; 无功配置; 存在问题

Technical analysis of dynamic reactive power compensation equipment applied in large-scale grid connected wind power plant and photovoltaic substation

ZHENG Hai-tao, ZHENG Xin, WU Xing-quan, YAO Tian-liang

(Energy Construction Group Gansu Electric power Design Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the necessity and specification requirements of static var generator (SVG) dynamic reactive power compensation applied in large-scale grid connected wind power plant and photovoltaic substation, this paper comparatively studies the two kinds of reactive power compensation, i.e. static var compensator and static var generator, in terms of regulation characteristics, response speed and other performance indicators. For grid connected new energy projects in Gansu Province, it analyzes some details and misunderstandings about reactive power configuration and reactive power device operating experience of wind power plant. And it researches voltage support and reactive power of SVG to power system under grid failure condition, combined with analysis of typical accident case. Meanwhile, SVG selection, typical wiring program and common failure problems of centralized grid-connected photovoltaic substation in practical engineering applications are studied, which is benefit to similar projects.

Key words: wind power plant; photovoltaic substation; SVC; SVG; reactive power configuration; existing problems

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0149-06

0 引言

2008~2013年, 甘肃风电和光伏发电产业快速发展, 积累了丰富的新能源项目建设和运行经验。2013年底, 甘肃电网已并网的风电和光伏装机容量分别约700万kW和430万kW。

随着并网风电和光伏容量的与日俱增, 含大规模风电和光伏电力系统调度运行亟需解决既要让新能源电站尽可能多发电, 又要保证电网安全稳定运行^[1-7]的问题。因为风电的出力特点是随机性大, 时有时无, 光伏的出力特性是晴天时白天有夜间无, 周期性很强, 但多云天气时也是时有时无, 所以二者对电网而言都属于多变、冲击性负荷, 新能源并网

功率的变化必然引起并网点电压的频繁波动^[8-9], 尤其是在电网故障时, 直驱风机和光伏并网逆变器都存在低电压穿越过程, 不能提供足够的无功, 可能导致系统电压的长时间、大幅跌落, 诱发新能源电站出现大面积脱网事故, 例如: 酒泉风电基地“2·24”风机脱网事故, 风电脱网比例达到风电装机容量的54.4%。

为了提高含大容量风电和光伏电力系统的安全稳定性和改善电网电能质量, 静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC) 和静止无功发生器 (Static Var Generator, SVG) 动态无功补偿装置在大型风电场和光伏电站得到广泛应用, 特别是 SVG 新技术迅速崛起, 呈现逐步取代 SVC 的趋势。

实际上，并网技术规范关于风电和光伏的无功补偿要求，仅仅提到稳态时要满足系统电压调节需要，调节速度和调节精度满足要求，除此之外再没有具体的量化性能指标的强制要求，国内外相关权威技术论述也比较少见。但是，在实际工程应用中电网公司、发电企业和设计单位一致认可和青睐 SVG 动态无功补偿装置，至于选择 SVG 的原因却缺少有力的依据。文献[10-11]进行了一些有益探讨，但多是基础理论研究和个别案例的试验分析，缺乏对电网需求的分析和大规模风电和光伏运行经验的内容。本文基于甘肃电网内大量新能源工程设计、现场测试和运行经验反馈，研究了应用动态无功补偿的必要性，分析了风电场中 MCR 和 TCR 型 SVC 配置误区和运行经验不足的问题，并结合工程经验研究了光伏电站 SVG 配置方案和常见故障问题。

1 动态调节无功补偿装置

1.1 两种 SVC 工作原理

常见应用于大型风电场的 SVC 装置，主要有磁控电抗器 (Magnetic Control Reactor, MCR)型和晶闸管控制电抗器 (Thyristor Controlled Reactor, TCR) 型。两种 SVC 装置的单相电气结构示意图如图 1 所示。

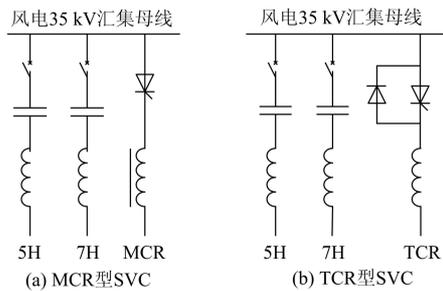


图 1 SVC 电气结构示意图

Fig. 1 Electrical schematic figure of SVC

(1) MCR 型 SVC 由 1 套 MCR 装置和 2 个滤波电容器组构成。电容器组由常规电容器和电感组成，主要用于补偿容性无功功率，兼顾滤波功能，不能调节。MCR 装置由可控硅模块和电抗器串联组成，主要用于补偿感性无功功率，工作原理是通过控制可控硅的导通角，改变流过电抗的直流励磁电流达到平滑调节电抗器输出感性无功功率的目的。电容器组的容性无功功率被 MCR 的感性无功功率欠补偿或过补偿后剩余的无功功率即为 SVC 发出的无功功率。

(2) TCR 型 SVC 是由 1 套 TCR 装置和 2 个滤波电容器组构成。TCR 装置内有检测、控制、触

发电路，先检测系统变量，计算处理系统需求变量，然后通过调整晶闸管的触发角改变电抗器的等效电抗，实现连续调节电抗器输出的感性无功功率。与 MCR 相同，TCR 输出的无功补偿功率也是感性和容性无功功率之和。

1.2 SVG 工作原理

SVG^[12-13]是全新的动态无功补偿装置，广泛应用于大型风电场和光伏电站作为无功补偿设备。SVG 核心技术是基于可快速导通和关断的半导体器件 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 和脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术，构造三相全控桥式整流逆变电路，交流侧经电抗与电网相连。按电路结构分类，SVG 分电压型桥式电路和电流型桥式电路，因为前者工作效率高，所以工程上应用的 SVG 绝大多数采用电压型桥式电路。SVG 单相电气结构示意图如图 2 所示。

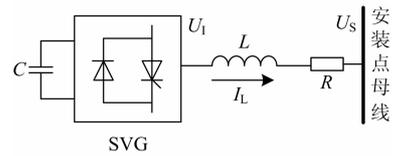


图 2 SVG 电气结构示意图

Fig. 2 Electrical schematic figure of SVG

SVG 补偿原理：通过改变 SVG 交流侧电压 $U_{Inverter}$ 和并网点电压 U_{System} 两个电压幅值的相对大小，实现得到超前或滞后于 U_{System} 的无功电流，实现动态补偿系统需要的无功功率的目的。图 2 中， R 电阻值很小可以忽略不计，则 SVG 电路流过的电流 $I_L = \frac{U_i - U_s}{X_L}$ ， I_L 可能大于零，也可能小于零，或者等于零，分别对应于 SVG 的容性、感性和空载三种运行工况，波形和向量图如图 3 所示。

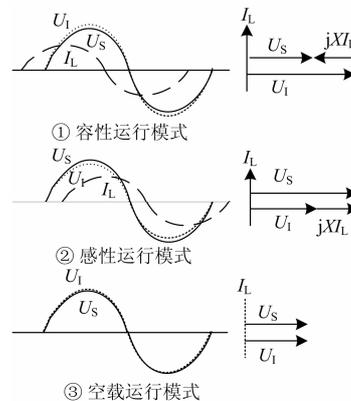


图 3 SVG 三种运行模式

Fig. 3 Three operation modes of SVG

1.3 SVC 与 SVG 性能指标比较

表 1 对比结果, 全容量 SVG 能够实现容性~感性动态连续可调, 响应时间快, 无功电流维持能力强, 工作效率高等优点, 完全占据优势。至于技术复杂、价格较高、对环境和散热要求较高等问题, 随着技术的发展和制造工艺的进步都可以解决。

表 1 性能指标对比表

设备型式	MCR	TCR	SVG
补偿原理	FC+可调 MCR	FC+可调 TCR	桥式逆变电路
电气结构	简单	较复杂	复杂
调节范围	容性~(感性-容性)	容性~(感性-容性)	全容量
响应速度	慢	较快	快
无功电流	弱	弱	强
电压关系	与 U^2 成正比	与 U^2 成正比	与 U 成正比
工作效率	较高	低	高
有功损耗	较大	大	小
储能元件	容量大	容量大	容量小
谐波含量	较高	高	低
维护成本	高	较高	低
占地面积	小	大	中
适应环境	适应风沙环境	环境要求较高	环境要求高
产品价格	低	较高	高

2 动态无功补偿装置应用技术分析

2.1 规范中相关要求

NB/T31003-2011《大型风电场并网设计技术规范》要求: 并网点电压应能控制在额定电压的 $-3\% \sim +7\%$ 范围内, 风电场无功调节速度应能满足电网电压调节需要, 必要时加装动态无功补偿装置。

QGDW392-2009《风电场接入电网技术规定》要求: 风电场应配置无功电压控制系统实现对并网点电压的控制, 调节速度和调节精度应满足电网电压调节要求。

GB/T19964-2012《光伏发电站接入电力系统技术规定》要求: 光伏逆变器功率因数在超前 $0.95 \sim$ 滞后 0.95 范围内动态可调, 不能满足系统电压调节需要时, 应集中加装适当容量的无功补偿装置, 必要时加装动态无功补偿装置。

综上, 现行规范没有强制推行全容量 SVG, 但提到必要时加装动态无功补偿设备, 随着对电网动态无功补偿必要性的深入认识和规范修订, 将来存在将 SVG 的应用写入标准的可能性。

2.2 甘肃风电和光伏的无功补偿方式

2.2.1 典型无功补偿配置方案

选取具有代表性的甘肃已并网大型风电场和光伏电站无功补偿配置方案列于表 2 中。

表 2 典型无功补偿配置方案

风电场光伏	容量/ MW	补偿 比例/%	调节和滤波支路容量/Mvar				
			可调节单元	3	5	7	
风 电	干河口东	200	21	MCR 感性 49.5	21	21	\
	干河口西	200	18	TCR 感性 49.5	10	15	10
	干河口北	200	18	SVG 16	4	8	8
	北大桥西	200	15	TCR 感性 39	15	15	\
	北大桥东	200	22	SVG 12	18	14	\
	桥湾	200	11	MCR 感性 27	11	11	\
	昌马西	200	17	SVG 16	\	9	9
	咸水井	99	11	TCR 感性 13	\	8	2.5
	玉门	96	10	SVG 10	\	\	\
	华家岭	50	20	SVG 10	\	\	\
光 伏	武威凉州	100	20	SVG 20	\	\	\
	嘉峪关	47	25	TCR 感性 20	6	6	\
	敦煌鸣山	113	19	SVG 21.3	\	\	\
	永昌	100	30	SVG 30	预留位置		
	金昌	100	30	SVG 32	预留位置		

由表 2 看出, MCR、TCR、SVG 三种型式的动态无功补偿装置在并网风电场和光伏电站中都有运用。但在不同场站配置方案存在差异, MCR、TCR 多存在于 2010 年以前的并网项目, 2012 年后全部选择全容量 SVG, 总体来看, 近两年容性无功功率的最大补偿比例有所提高。由于受器件和造价的影响, 在此之间也出现过“FC+SVG”的组合方案。

2.2.2 性能参数实测分析

文献[14-15]针对 MCR、TCR、SVG 三种型式动态无功补偿装置的无功功率调节范围、动态响应时间、谐波含量进行了实测, 测试结果如表 3 所示。

表 3 性能参数测试结果

比较项目	MCR	TCR	SVG
响应时间/ms	6 659	29.16	16.8
有功损耗/%	0.04~3.29	0.05~9.37	0.67~1.86
总谐波畸变率/%	3.8	0.37	0.28

分析得出主要结论: ①SVG 和 TCR 的响应时间均为毫秒级, 满足不大于 30 ms 要求, MCR 响应速度慢, 响应时间为秒级。②TCR 有功损耗最大, MCR 次之, SVG 最小。③谐波含量 TCR 最高, SVG 最低。

2.2.3 风电典型事故分析

在酒泉风电基地“2·24”风机大面积脱网事故中, 由于瓜州地区风电场无功补偿设备多采用 MCR 型或 TCR 型 SVC, 区域风机低电压穿越能力较差, 是造成事故直接原因之一。以北大桥西风电场为例分析如下: 故障瞬间, 北大桥西升压站 35 kV 母线电压跌落 33% , 该风电场内 TCR 型 SVC 动态无功

补偿装置未能快速响应，造成大量风机脱网，故障消除时 SVC 又不能自动退出，继续向系统注入无功，造成风电场并网点电压过高，风机过电压保护动作导致脱网，事故继续扩大。

与瓜州地区不同的是，在此次事故中，玉门地区风电机群却能够正常与电网保持稳定运行。昌马西升压站~玉门变上网线路发生故障、切除故障时系统内主要节点电压波动曲线和 SVG 输出电流曲线如图 4 所示。

原因分析：昌马西风电场装机容量 600 MW，故障发生时 330 kV 升压站 SVG 正常运行，区域内 110 kV 上网的风电场群（约 600 MW）也全部采用 SVG 动态无功补偿方案，同时玉门变供电系统内有约 250 MW 小水电具备无功调节能力。

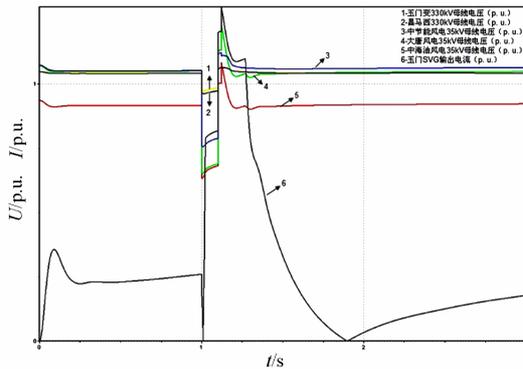


图 4 主要母线电压波动和 SVG 输出电流曲线
Fig. 4 Main bus voltage fluctuation and SVG output current curve

正常运行情况，玉门地区风电、水电通过玉门变~嘉峪关变双回 330 kV 线路远距离送出，末端电压偏高，风电场升压站内 SVG 能够吸收系统无功，风电场并网点电压维持在合理水平。在故障发生时，SVG 动态无功补偿装置和水电能够及时为系统提供无功支撑，满足系统调压速度和精度要求，有利于区域风电机群渡过低电压穿越过程。

3 工程应用中存在的问题

3.1 风电场 SVC 配置问题

从表 2 可以看出，SVC 在风电场中的应用是伴随风电的开发建设逐步摸索和完善的过程，因此在早期风电场升压站内 SVC 选型标准很不统一。根据现场实际运行和试验结论，主要存在以下误区和细节问题：

- (1) MCR 响应速度太慢，不能满足系统调压过程中对调节速度和调节精度要求。
- (2) 对 MCR、TCR 原理理解不透彻，表现在

感性容量配置不足，误认为感性支路容量即为能够呈现最大感性容量，实际上应为感性容量完全补偿容性容量之后的感性容量。

(3) 风场值班人员运行经验缺乏，部分 MCR、TCR 不具备自动投切功能，在系统需要无功时 SVC 经常处于停运消缺状态，或者滤波支路不能全部投入，达不到需要容性无功的设计最大值。还有，在故障发生后切除部分风机后不能快速退出容性无功支路，导致电压升高，风机过电压脱网。

(4) 无功补偿容量配置比例需要适当提高，由表 2 看出早期配置比例在 20%以下，近年来配置比例提高至约 30%，具体与接入方案有关。

(5) 酒泉一期风电场升压站内主变选择两绕组主变，接线形式 Y_Nd11 ，35kV 侧为角接，因此不需要加装 3 次滤波支路，应该加装 5 次和 7 次滤波支路。

上述问题主要体现在酒泉一期风电场，目前部分正在进行整改。甘肃后续酒泉二期风电工程、民勤百万风电等项目都选择使用全容量 SVG，由于单个风电场容量较大，SVG 需要的容量较大(约 60 Mvar)，在单套容量不能满足要求时采用 2 套并联的解决方案。

3.2 光伏升压站内 SVG 典型接线

新能源发电项目的“扩张式”发展推动了 SVG 市场的迅速崛起，并且 SVG 正在逐步取代 SVC。甘肃光伏发电项目吸取了风电建设经验，绝大多数采用全容量 SVG 动态补偿方案。

目前，主流的 SVG 动态补偿装置并网侧电压等级主要有 10 kV 和 35kV，行业习惯分别称之为“10 kV 降压式 SVG”和“35 kV 直挂式 SVG”。因此，升压站内 SVG 典型接线也有两种，如图 5 所示。

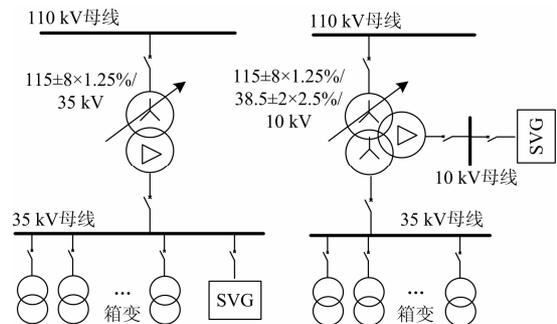


图 5 升压站内 SVG 典型接线图
Fig. 5 SVG typical wiring diagram in booster station

- (1) 35 kV 直挂方式的优点是在风机或光伏集电线路侧直接补偿，补偿效果较好，可兼顾滤波功能。不占用主变容量，不需要连接变压器，单套设

备容量可以做到较大。缺点是属于新产品, 价格偏高, 技术成熟度有待提高。

(2) 10 kV 降压方式优点是技术相对成熟可靠。缺点需要连接变压器, 单套容量较小, 在第三绕组侧补偿, 需要穿越主变, 补偿效果弱, SVG 与滤波支路分离。

目前, 光伏电站多数情况下采用打捆并网, 因此在 SVG 选型的过程中存在一些容易纠结的问题, 大容量 SVG 造价太高, 且技术不成熟, 但是 35 kV 侧直接补偿是先进技术趋势, 通过 2 套 SVG 并联的方案可以满足大容量无功补偿需求。虽然早些年 10 kV 侧补偿的应用案例相对较多, 技术相对成熟, 但通常适用于小容量的补偿, 必然逐渐被 35 kV 直挂式补偿方式取代。经技术经济综合比较, 目前风电场和光伏电站多采用在 35 kV 侧集电线路侧直接补偿方案。

3.3 光伏电站 SVG 运行常见故障

SVG 动态无功补偿装置采用柜式结构, 设计安装简单, 内部采用模块化设计, 后期维护工作量小, 可实现远程监控。SVG 内部接线示意图如图 6 所示。

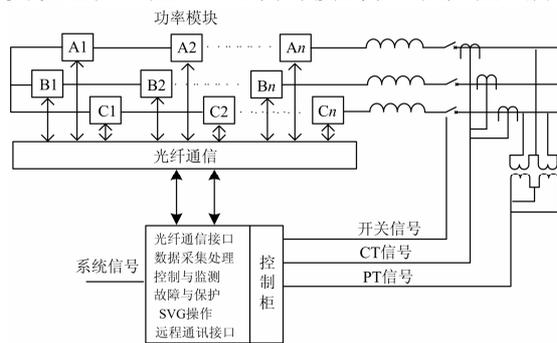


图 6 SVG 内部接线示意图

Fig. 6 Internal wiring diagram of SVG

SVG 新技术大量工程化应用时间较短, 在制造工艺、施工管理、产品运行稳定性、检修维护等方面还存在一些问题。甘肃光伏电站已投运 SVG 运行过程出现的典型故障统计及解决方案见表 4。

表 4 SVG 典型故障统计表

Table 4 Typical faults table of SVG

光伏电站	故障类型	解决方案	概率
敦煌	10 kV 降压式	链接驱动故障	更换驱动电源模块 41.6%
		链接放电发热	更换驱动电源模块 41.6%
		模块故障	更换工作模块 16.8%
金昌	35 kV 直挂式	链接驱动故障	更换驱动电源模块 35.7%
		链接放电发热	更换驱动电源模块 14.3%
		链接通讯故障	更换专用通讯电缆 14.3%
	模块故障	更换工作模块 28.6%	

由表 4 看出, 不论是 35 kV 直挂式还是 10 kV 降压式的 SVG, 驱动电源的故障、发热占据 50% 以上比例, 其次为 SVG 模块故障和通讯故障。故障原因分析, 国内荣信、思源等市场份额较大的几家 SVG 使用的 IGBT 都是进口器件, 因此工作模块故障概率相对较低, 现场主要故障原因是施工周期紧、施工保护措施不足造成的损坏、工作环境散热条件差等造成的。但是, 电源驱动模块多为国产, 发热、不稳定故障概率较高。通讯故障主要原因是冬季敷设施工, 光缆质地硬, 光缆敷设不合理, 传输距离过长造成光信号衰减, 引起 SVG 控制装置误动作。综上分析, SVG 工程应用需要加强非关键附属部件质量和施工工艺的控制。

4 结论

(1) MCR 和 TCR 型 SVC 应用于大型风电场无功补偿时, 要求能实现快速自动投切功能, 调节支路需要安装足够的感性容量, 要根据实际需要正确配置滤波支路, 同时加强 SVC 投退管理工作。

(2) SVG 的响应速度快, 能够从容性~感性动态连续可调, 在暂态情况下无功维持能力强, 能够提供无功支撑, 有利于新能源电站电压恢复重建, 有利于风机和光伏并网逆变器顺利度过低电压穿越过程, 是并网大型风电场和光伏电站理想的无功解决方案。

(3) SVG 新技术在产品质量、施工维护、现场夏季散热和冬季保温等方面需要改进。SVG 未来研究方向应该为大容量、高稳定性、区域 SVG 群控策略方面。

参考文献

- [1] 刘峻, 何世恩. 建设坚强智能电网助推酒泉风电基地发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 19-23.
LIU Jun, HE Shi-en. Strong smart grid boosted Jiuquan wind power based development[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 19-23.
- [2] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.
HE Shi-en, DONG Xin-zhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137.
- [3] 乔嘉庚, 鲁宗相, 闵勇. 风电场并网的新型实用等效方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 209-213.
QIAO Jia-geng, LU Zong-xiang, MIN Yong. New

- dynamic equivalence method for grid-connected wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 209-213.
- [4] 李凤婷, 晁勤. 基于 Matlab 与遗传算法的风电容量[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 178-182.
LI Feng-ting, CHAO Qin. Wind power capacity based on matlab and genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 178-182.
- [5] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场的电力系统机组组合问题随机模拟粒子群算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 129-137.
JIANG Yue-wen, CHEN Chong, WEN Bu-ying. Particle swarm research of stochastic for unit commitment wind farms integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 129-137.
- [6] 薛志英, 周明, 李赓银. 大规模风电接入电力系统备用决策评述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 148-153.
XUE Zhi-ying, ZHOU Ming, LI Geng-yin. Survey on reserve decision of power systems with large scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 148-153.
- [7] 任博强, 彭鸣鸿, 蒋传文. 计及风电成本的电力系统短期经济调度建模[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 67-72.
REN Bo-qiang, PENG Ming-hong, JIANG Chuan-wen. Short term economic dispatch of power system modeling considering the cost of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 67-72.
- [8] 马春明, 解大, 余志文, 等. SVG 的电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 96-99.
MA Chun-ming, XIE Da, YU Zhi-wen, et al. Voltage control strategy of SVG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 96-99.
- [9] 赵利刚, 房大中, 孔祥玉, 等. 综合利用 SVC 和风力发电机组的风电场无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 45-55.
ZHAO Li-gang, FANG Da-zhong, KONG Xiang-yu, et al. A strategy of reactive power control for wind farm operation using SVC and DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 45-55.
- [10] 郑伟, 拜润卿, 宋磊, 等. 静止无功发生器在风电场电网的应用研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(4): 35-37.
ZHENG Wei, BAI Run-qing, SONG Lei, et al. The applied research of SVG in wind power system[J]. Power Electronics, 2012, 46(4): 35-37.
- [11] 杨勇, 秦睿, 拜润卿, 等. 动态无功补偿装置在酒泉地区风电场的优化应用[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(4): 81-85.
YANG Yong, QIN Rui, BAI Run-qing, et al. Optimizing application of dynamic reactive power compensation devices in Jiuquan wind farms[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(4): 81-85.
- [12] 徐惠勇. 无功功率补偿中 SVG 技术的研究现状及发展[J]. 应用能源技术, 2012(2): 31-33.
XU Hui-yong. Reactive power compensation in SVG technology research and development[J]. Applied Energy Technology, 2012(2): 31-33.
- [13] 赖晓文, 陈启鑫, 夏清, 等. 基于 SVG 技术的电力系统可视化平台集成与方法库开发[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 76-81.
LAI Xiao-wen, CHEN Qi-xin, XIA Qing, et al. Development of power system visualization platform and methods library based on SVG technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 76-81.
- [14] 拜润卿, 宋磊, 郑伟, 等. 10 GW 级风电基地 SVG 控制参数优化研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(9): 13-15.
BAI Run-qing, SONG Lei, ZHENG Wei, et al. Research on control parameter optimization of SVG applied in 10 GW wind power base[J]. Power Electronics, 2012, 46(9): 13-15.
- [15] 拜润卿, 秦睿, 智勇, 等. 风电基地动态无功补偿装置参数实测与分析[J]. 中国电力, 2012, 45(2): 54-57.
BAI Run-qing, QIN Rui, ZHI Yong, et al. Parameter test and analysis for dynamic compensation devices in wind power farms[J]. Electric Power, 2012, 45(2): 54-57.

收稿日期: 2013-11-13; 修回日期: 2014-03-26

作者简介:

郑海涛(1969-), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统、变电电气设计等工作;

郑昕(1970-), 男, 正高级工程师, 研究方向为电力系统规划、继电保护等工作;

吴兴全(1976-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。