

SVG 的电压控制策略

马春明¹, 解 大¹, 余志文¹, 张延迟²

(1. 上海交通大学 国家能源智能电网(上海)研发中心, 上海 200240;

2. 上海电机学院 电气工程系, 上海 200240)

摘要: 提出一种控制静止无功发生器(SVG)输出电流的策略,既能实时补偿负荷无功,又能改善负荷接入电网点的电压波形。根据装置工作原理推导了控制策略及其可行性。根据负荷峰值电压判断负荷接入处电压是否跌落。电压稳定时装置工作在常规无功补偿状态下,输出负荷所需的无功电流;当接入网点电压因补偿区域的故障或者负荷突然加重等导致电压跌落较大时,装置可在输出所需无功的基础上短时消耗储能以维持补偿点电压。仿真结果表明所设计的复合功能装置具有响应速度快、动态特性好的优点。

关键词: 静止无功发生器; 低电压穿越; 仿真; 电压控制; 补偿

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.016

0 引言

随着电力电子技术的发展,各种非线性、冲击性负荷大量增加,这给电能质量污染带来了巨大的影响,电压跌落作为电能质量的一个重要方面备受关注^[1-3]。

电压控制装置主要采用动态电压恢复器(DVR),目前对它的研究主要集中在检测^[4-5]和补偿控制策略^[6-8]方面,主要采用基于 Park 变换的离散算法^[9-10]和传统的瞬时无功功率理论等,数学运算量大,在补偿的实时性等方面与实际应用要求有一定的差距。

文献[11]提出一种关于无功补偿的算法,它采用直流侧电容电压控制和系统无功电流反馈控制,电流环采用滞环比较;电压环采用周期控制,可以实时补偿负荷无功。但是,电压跌落时并未考虑如何控制无功补偿装置,为此本文提出针对静止无功发生器(SVG)电压的改进控制策略,使之既能动态补偿负荷的无功电流,又能在电压跌落时短时维护负荷电压稳定。

1 工作原理

SVG 的拓扑结构如图 1 所示,采用电压型桥式电路,直流侧采用电容为储能元件。其中, U_c 为逆变

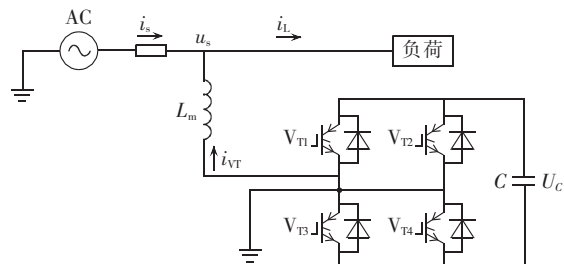


图 1 SVG 结构图

Fig.1 Structure of SVG

器直流侧电容电压,电容电压初始值设为 U_{c0} ; u_s 为补偿点电压; i_s 为系统电流; i_{VT} 为 SVG 补偿电流; i_L 为非线性负荷电流,它看作是系统的一个外部扰动输入量,这样既符合逆变器负载多种多样的实际情况,又可以建立一个形式简单而且不依赖具体负载类型的逆变器数学模型。

设补偿点电压为:

$$u_s = U_s \sin \omega t \quad (1)$$

在正常运行时,SVG 只需补偿无功;在补偿点电压瞬时跌落时,由于 SVG 本身消耗的有功能量很少,因而可忽略不计。

SVG 瞬时补偿电流为:

$$i_{ref}(t) = i_{qL}(t) + \Delta i_{pL}(t) = I_{qL} \cos \omega t + I_{pL} \sin \omega t \quad (2)$$

SVG 输出功率为:

$$P_{VT}(t) \approx q_L - \Delta P_L = I_{qL} U_s \sin \omega t \cos \omega t - I_{pL} U_s \sin^2 \omega t \quad (3)$$

瞬时无功功率 q_L 在一个周期内的积分为:

$$\int_0^T q_L dt = \int_0^T I_{qL} U_s \sin \omega t \cos \omega t dt = 0 \quad (4)$$

SVG 的有功功率 ΔP_L 在一个周期内的积分为:

$$\int_0^T \Delta P_L dt = \int_0^T I_{pL} U_s \sin^2 \omega t dt = \frac{T}{2} I_{pL} U_s \quad (5)$$

当电压跌落时,SVG 可以维持负荷电压稳定的周期个数 m 满足:

$$\frac{1}{2} C U_{c0}^2 - \frac{1}{2} C U_{c1}^2 = \frac{mT}{2} I_{pL} U_s \quad (6)$$

为了使补偿点负荷无功正常补偿, U_{c1} 不能为 0。假设 $U_{c1} = \alpha U_{c0}$ ($0 < \alpha < 1$), 则此时 SVG 可维持负荷电压稳定的时间为:

$$t_s \approx mT = \frac{C(1-\alpha^2)U_{c0}^2}{U_s I_{pL}} \quad (7)$$

其中, I_{pL} 是补偿器输出的损耗有功电流。 t_s 与 C 、 U_{c0} 的平方成正比,与 I_{pL} 成反比。

根据式(2)和(7)得出结论:要保证 SVG 有效输

出补偿电流,使得负荷的输入电流只有有功电流和负荷电压稳定,需要解决 2 个关键问题:一是保证能准确检测到补偿点电压跌落幅值和相位,作为算法计算和补偿的基准;二是需能准确获得各种目标电流,保证等效负荷的功率只有有功成分。

由式(7)可得到 I_{pL} 的计算公式如下:

$$I_{pL} \approx \frac{C(1-\alpha^2)U_{\omega}^2}{U_s t_s} \tag{8}$$

式(8)可作为计算 SVG 可接受的电压跌落的程度以及持续时间的理论依据。在风机低电压穿越问题中,典型的规定是在风机并网电压跌落至 20% 时,风机能够保持至少 625 ms 不脱网运行^[12-13],因而 t_s 取为 625 ms,计算可接受的电压跌落程度,若电压跌落为瞬时短路造成的,则可根据并网点电压和 I_{pL} 计算短路时的接地电阻。

2 控制策略设计

2.1 工作模式选择

为了判断补偿点电压是否跌落,可先对补偿点进行峰值电压采样,然后进行判断。峰值电压采样的方法有很多:可以利用快速傅里叶变换进行峰值检测,但算法上比较复杂^[14];也可以采用软硬件相结合的峰值检测算法,但同样比较复杂,而且很难检测出突然变化的峰值^[15]。

本文采用如图 2 所示的方法:待检测的电压 u_s ,通过锁相环(PLL)后,再通过正弦波发生器产生一个与 u_s 同相位的单位正弦波形 $f(t)$, $f(t)$ 的相位和频率与 u_s 相同,逻辑判断 $f(t)$ 是否大于一个固定常数(此处取为 0.99),来产生采样峰值触发脉冲,触发脉冲的宽度可通过更改固定常数来调整。

u_s 峰值采样完成后,判断峰值采样电压 U_m 与负荷正常运行的最小值 U_{min} 的大小,如果 $U_m > U_{min}$,则只进行负荷无功电流的补偿;如果 $U_m < U_{min}$,则消耗 SVG 直流环节储存的能量,维持负荷电压稳定。

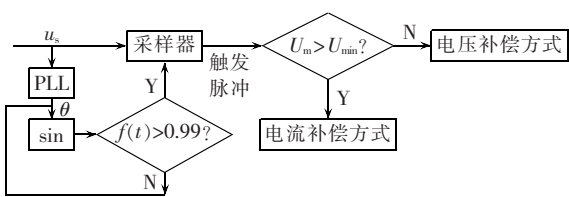


图 2 SVG 工作模式选择
Fig.2 Selection of SVG working mode

补偿装置四桥臂上的 IGBT 的滞环控制信号可参照表 1。根据表 1 的逻辑关系,可用图 3 的逻辑控制图来实现 IGBT 的控制。其中, S_1 — S_4 对应电压补偿方式下, IGBT 的预处理的控制信号; S_5 — S_8 对应电流补偿方式下, IGBT 的预处理的控制信号,在逻辑判断“ $U_m > U_{min}$ ”后进行相应的控制。

表 1 IGBT 通断的控制信号参照表
Tab.1 Reference of IGBT on-off control signal

$U_m > U_{min}?$	$U_s > u_s^*$	$I_C > i_C^*$	V_{T1}, V_{T3}	V_{T2}, V_{T4}
(N) 电压补偿阶段	1	×	1	0
	0	×	0	1
(Y) 电流补偿阶段	×	1	1	0
	×	0	0	1

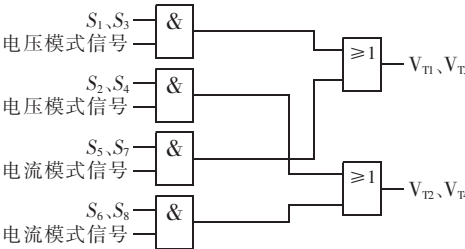


图 3 IGBT 通断的逻辑控制图
Fig.3 Logic chart of IGBT on-off control

2.2 电压补偿工作模式

根据 SVG 的工作原理知道,可把 SVG 视为交流电流源,通过对逆变器输出端交流电源的相位和幅值的控制,来间接控制 SVG 的输出电流,保持负荷电压的稳定。

负荷加重时,若 $U_m < U_{min}$,进入电压补偿阶段,目标电压的计算如图 4 所示。

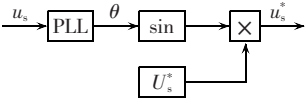


图 4 目标电压算法
Fig.4 Target voltage algorithm

根据负荷所在支路的电压设定 U_s^* 的值,对系统电压 u_s 的相位进行锁存,经过正弦波发生器产生一同相位的单位正弦信号,两者经过乘法器后,得到目标电压,目标电压与待补偿的支路电压进行滞环逻辑比较,利用脉宽调制技术(PWM)产生脉冲,控制 IGBT 的通断,从而控制连接在主电路中的装置的电流输出,达到维持负荷电压稳定的目的。

在 EMTP 仿真软件中,电压 u_s 经过 PLL 后产生与电压 u_s 相位相同的单位正弦波,因而目标电压的检测只用到一次乘法器和锁相环,容易实现。

2.3 电流补偿工作模式

当负荷电压基本不发生变化时,即满足 $U_m > U_{min}$ 时,只进行负荷无功电流的补偿。按照 PWM 控制规律,根据功率平衡原理,当电容 C 上的电压保持不变时,电感 L 上输出的电流 i_{VT} 就不包含基波有功电流。保持直流侧电容电压恒定是控制目标之一。直流侧电压的变化由两部分引起:直流侧和交流测的无功交换、补偿装置的损耗功率。可以采用有功损耗电流检测算法的方法补偿无功;也可以采用通过计算得到负荷无功电流的幅值和相位 2 个方面的信息,得

到目标电流^[16]。本算法采用后者,计算出负荷所需无功电流进行补偿,具体理论推导如下所示。

将补偿点电压 u_s 延迟 5 ms 得到:

$$u'_s = U_s \cos \omega t \quad (9)$$

$$Q_s = \frac{1}{T} \int_0^T u'_s i_L dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_s \cos \omega t I_L \sin(\omega t + \varphi) dt =$$

$$\frac{U_s I_L}{2} \sin \varphi \quad (10)$$

所以得到目标无功电流幅值:

$$I_{qL} = I_L \sin \varphi = \frac{2Q}{U_s} \quad (11)$$

目标无功电流计算如图 5 所示。

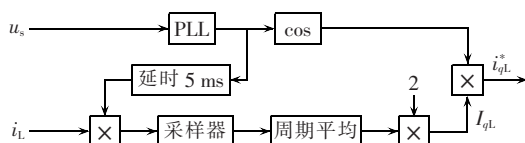


图 5 无功目标电流算法

Fig.5 Target reactive current algorithm

这种算法直接通过计算无功得到目标无功电流幅值,减小计算量,同时避免系统电压突变等情况的影响。在原有算法上,仅用了一个延时器、一个乘法器和一个周期平均环节就可以得到系统的无功电流分量,实现非常简单。

3 仿真实验

3.1 运行特性分析

为了验证控制策略的有效性,采用下列运行过程:在 0~0.1 s 区间,非线性负荷正常运行;0.1~0.3 s 区间,加重负荷,加重的负荷以 4 Ω 电阻和 3 Ω 电感串联为例;在 0.3 s 以后,恢复正常运行状态。

电源电压取峰值为 310 V 的交流电源,电容值取为 20 mF,电容初始电压取为 450 V,在 0.1 s 时负荷加重,由于峰值采样的负荷电压低于 260 V,因而进入电压补偿阶段;0.3 s 切除加重的负荷时,为了防止误操作,经过一定的延时(本实验设计为至多 60 ms)后,恢复正常运行时负荷无功电流补偿的状态。

系统工作时,负荷电压波形如图 6 所示,SVG 的输出电流如图 7 所示。分析其工作特性如下:对比图 6 和图 7,在 0.1 s 之前,只进行负荷无功电流的补偿;0.1 s 加重负荷后,SVG 由仅进行无功电流的补偿转换为维持负荷电压的稳定;在 0.3 s 切除加重的负荷后,SVG 由维持负荷电压的稳定转换为仅进行负荷无功电流的补偿。

没有 SVG 时,其仿真参数设置与上述实验相同,负荷电压的变化如图 8 所示。有 SVG 时,但只按照电流工作模式下进行无功补偿,负荷电压的波形如图 9 所示,SVG 输出电流的波形比较如图 10 所示。

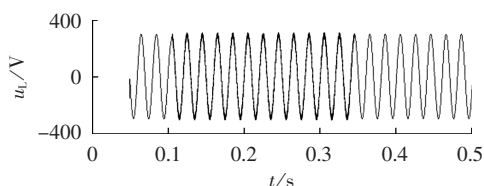


图 6 有 SVG 时的负荷电压

Fig.6 Load voltage with SVG

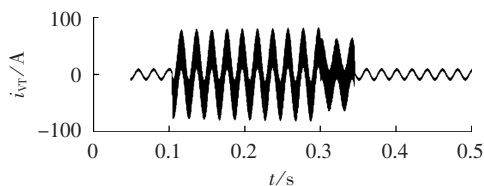


图 7 SVG 输出的补偿电流

Fig.7 Compensation current output by SVG

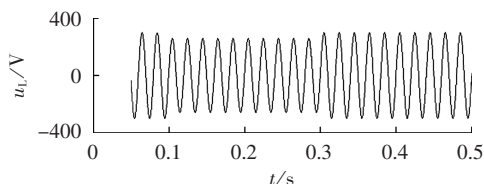


图 8 没有 SVG 时的负荷电压

Fig.8 Load voltage without SVG

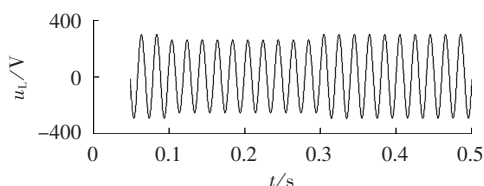


图 9 只进行无功补偿时的电压波形

Fig.9 Voltage waveform only with reactive power compensation

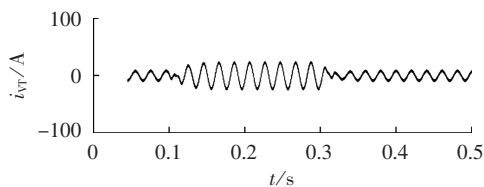


图 10 只进行无功补偿时的电流波形

Fig.10 Current waveform only with reactive power compensation

比较图 6、8、9 可知,电压跌落时,没有 SVG 且只进行无功补偿时,无法维持负荷电压稳定;比较图 7 和图 10 可知,前者不但可以补偿无功,而且电压跌落时能维持负荷电压稳定,后者只能补偿负荷变化时的无功。

3.2 各参数对运行特性的影响

由其工作原理可知,电压跌落时,SVG 可维持电压稳定的时间 t_s 与 C 、 U_{c0} 、 α 和 I_{pL} 有关。

设直流侧电容电压初始值 $U_{c0}=450$ V,通过改变电容 C ,得到如图 11 所示的直流侧电压。

由图 11 可以看出,电容电压波动幅值随电容值的增大而变小,当电容值较小时,电容上的储能也小,

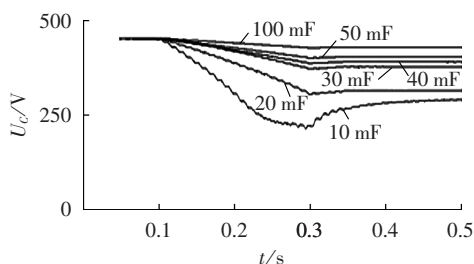


图 11 $U_{d0}=450\text{ V}$ 时直流侧电容电压

Fig.11 DC link capacitor voltage when $U_{d0}=450\text{ V}$

电容电压波动很大,维持负荷电压稳定的时间有限。当电容电压过小时,SVG 出口端电压无法达到要求,考虑到实际电路中导线上电阻损耗、电容介损等因素,不仅无法维持补偿点电压稳定,甚至不能补偿负荷无功。

考虑电阻损耗、电容介损等因素, α 取为 0.2。SVG 可接受的电压跌落程度计算过程如下:电压跌落持续时间为 200 ms 时,根据式(8)得到 $I_{pl}\approx 62.71\text{ A}$,结合并网点电压计算出可维持的短路接地电阻 $R=3.49\ \Omega$ 。本次实验的过载负荷为 4 Ω 电阻和 3 Ω 电感串联,是在可以维持的过载范围以内,理论得到验证。

4 结论

本文提出的 SVG 的电压控制策略实现简单,动态响应速度快。仿真结果表明,所提策略不仅对负荷的无功进行补偿,而且实时检测负荷电压,一旦发生跌落就进行短时维护负荷的电压稳定,对提高风机低电压穿越能力有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 占勇,程浩忠. 电能质量复合扰动分类识别[J]. 电力自动化设备, 2009,29(3):93-97.
ZHAN Yong,CHENG Haozhong. Classification of power quality complex disturbances[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29(3):93-97.
- [2] 王宾,潘贞存,徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术,2004,28(2):56-59.
WANG Bin,PAN Zhencun,XU Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology,2004,28(2):56-59.
- [3] 刘颖英,徐永海,肖湘宁. 地区电网电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):130-136.
LIU Yingying,XU Yonghai,XIAO Xiangning. Analysis of new method on power quality comprehensive evaluation for regional grid[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(22):130-136.
- [4] FITZER C,BARNES M,GREEN P. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2004,40(1):203-212.
- [5] 杨亚飞,颜湘武,娄尧林,等. 一种新的电压骤降特征量检测方法

- [J]. 电力系统自动化,2004,28(2):41-44.
- YANG Yafei,YAN Xiangwu,LOU Yaolin,et al. A new method to detect voltage sag characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(2):41-44.
- [6] 李承,邹云屏,范婕. 动态电压恢复器单周期控制策略的建模与仿真控制[J]. 电力自动化设备,2006,26(4):7-10.
LI Cheng,ZOU Yunping,FAN Jie. Modeling and simulation of single-phase DVR based on one-cycle control[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(4):7-10.
- [7] 申科,王建勋,蔡兴国,等. 动态电压恢复器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):65-69.
SHEN Ke,WANG Jianze,CAI Xingguo,et al. Proportional-resonant control for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):65-69.
- [8] LEE D M,HABETLER T G,HARLEY R G,et al. A voltage sag supporter utilizing a PWM-switched autotransformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):626-635.
- [9] CHENG P T,HUANG C C,PAN C C,et al. Design and implementation of a series voltage sag compensator under practical utility conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003,39(3):844-853.
- [10] 肖冰,梁军,路平,等. 一种基于派克变换的电压跌落检测改进离散算法[J]. 电力系统保护与控制,2005,33(13):50-54.
XIAO Bing,LIANG Jun,LU Ping,et al. An improved discrete method for detecting voltage sag based on Park transformation [J]. Power System Protection and Control,2005,33(13):50-54.
- [11] 龚锦霞,卢婧婧,解大,等. 一种新型动态无功补偿器的控制算法[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):89-93.
GONG Jinxia,LU Jingjing,XIE Da,et al. Control strategy for dynamic var compensation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):89-93.
- [12] LOPEZ J,SANCHIS P,ROBOAM X,et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(3):709-717.
- [13] SONG H S,NAM K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1999,46(5):953-959.
- [14] 王江,杨敏,陈亚骏. 一种基于 DSP 的工频电测量发生卡的研制[J]. 电子技术,1999(6):41-43.
WANG Jiang,YANG Min,CHEN Yajun. DSP-based frequency occurred card for electrical measurement[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,1999(6):41-43.
- [15] 林新春,段善旭,康勇,等. UPS 中基于 DSP 的峰值电压检测方法[J]. 电力电子技术,2001,35(3):59-61.
LIN Xinchun,DUAN Shanxu,KANG Yong,et al. An approach for detecting the peak value in UPS using DSP[J]. Power Electronics,2001,35(3):59-61.
- [16] 卢婧婧. 基于状态向量空间模型的 FACTS 控制策略研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
LU Jingjing. Research on FACTS control strategy based on state-space model[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2010.

- WEI Xuehao,ZHOU Hao. Evaluating the environmental value schedule of pollutants mitigated in China thermal power industry [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 53-56.
- [22] 张娜,蔡睿贤. SO_2 、 NO_x 与 CO_2 排气罚款的应有数量级[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(4): 286-288.
- ZHANG Na, CAI Ruixian. The proper order of magnitude of penalty for pollutant emission[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(4): 286-288.
- [23] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [24] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
- LIU Xiaoping, DING Ming, ZHANG Yingyuan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-84.
- [25] 金群, 李欣然. 遗传算法参数设置及其在负荷建模中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 23-27.
- JIN Qun, LI Xinran. GA parameter setting and its application in load modeling[J]. Electric Power Automation Equipment,

2006, 26(5): 23-27.

- [26] MANWELL J F, MCGOWAN J G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems[J]. Solar Energy, 1993, 50(5): 399-405.

作者简介:

洪博文(1985-), 男, 江西婺源人, 博士研究生, 主要研究方向为分布式发电系统优化设计与管理(E-mail: bowenhh@sina.com);

郭力(1981-), 男, 山东济宁人, 副教授, 主要研究方向为分布式发电、微电网(E-mail: liguo@tju.edu.cn);

王成山(1962-), 男, 天津人, 长江学者特聘教授, 主要研究方向为电力系统安全性分析、城市电网规划和分布式发电系统(E-mail: cswang@tju.edu.cn);

焦冰琦(1989-), 男, 山西晋城人, 博士研究生, 主要研究方向为微电网优化规划设计(E-mail: bqjiao@tju.edu.cn);

刘文建(1988-), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网优化规划设计(E-mail: wjl3216@gmail.com)。

Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid

HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, JIAO Bingqi, LIU Wenjian

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A general model of dynamic multi-objective optimal dispatch is constructed to minimize the operational and environmental costs of microgrid, which takes two independent modules as its core: system simulation module and operation optimization module. The simulation module applies the energy model to evaluate the economic and environmental indexes of dispatch scheme while the optimization module applies the multi-objective generic algorithm of NSGA-II to optimize the scheme. The initial-point-guide technology and the duplicate-removal operation are introduced into NSGA-II to improve its convergence performance and the distribution characteristics of its Pareto front. The model and method are applied in the day-ahead optimal dispatch of a typical PV-wind-battery-diesel microgrid, which verifies their effect.

Key words: microgrid; multi-objective; optimization; dispatch; models

(上接第 99 页 continued from page 99)

作者简介:

马春明(1987-), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统 FACTS 和电力系统仿真(E-mail: machunming111@163.com);

解大(1969-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要

研究方向为电力系统 FACTS 和电力系统仿真;

余志文(1987-), 男, 湖南冷水江人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统 FACTS 和电力系统仿真;

张延迟(1967-), 男, 北京人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为并网型风力发电机和电力系统 FACTS。

Voltage control strategy of SVG

MA Chunming¹, XIE Da¹, YU Zhiwen¹, ZHANG Yanchi²

(1. SSGC, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A control strategy of SVG output current is proposed, which compensates in real time the reactive power of dynamic load and improves the voltage waveform of its grid-connected point. The control strategy and its feasibility are derived from the working principle of SVG. The voltage drop on grid-connected point is detected according to the peak voltage of load. When the voltage is steady, the device outputs the reactive power required by load; when the voltage drops due to system fault or load augment, the device consumes temporarily the stored energy to maintain the voltage stable. Simulative results show that the designed device has fast response and good dynamic performance.

Key words: SVG; low-voltage ride-through; computer simulation; voltage control; compensation