

微电网动态电压恢复器运行模式研究

成瑞芬¹, 韩肖清¹, 王鹏¹, 秦文萍¹, 张东霞²

(1. 太原理工大学 电气工程学院, 山西省 太原市 030024;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Research on Operation Modes of Dynamic Voltage Restorer in Microgrid

CHENG Ruifen¹, HAN Xiaoqing¹, WANG Peng¹, QIN Wenping¹, ZHANG Dongxia²

(1. College of Electrical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In allusion to dissatisfied voltage quality of microgrid, a dynamic voltage restorer (DVR) based on photovoltaic (PV) generation/battery units is proposed. Utilizing PV generation/battery units as energy storage component and via rectifier, the proposed DVR is connected in series with the point of common coupling (PCC), where the microgrid low-voltage is connected to distribution network. Three operating modes of DVR, namely the dynamic voltage restoration mode, the uninterruptible power supply mode and the micro-source mode, are put forward. Through reasonably control strategy, the switching-over among the three operation modes can be effectively implemented to improve the utilization rate of DVR. The dynamic voltage restoration mode of DVR can suppress voltage sag and voltage swell effectively, thus the voltage quality is improved; the uninterruptible power supply mode can improve the reliability of power supply; using the micro-source mode, the power supply from power grid can be reduced and it is favorable for energy conservation and emission reduction. The effectiveness of the proposed DVR is verified by results of simulation based on Matlab /Simulink.

KEY WORDS: DVR; microgrid; power quality; voltage quality; energy conservation and emission reduction

摘要: 针对微电网中存在的电压质量问题, 提出了基于光蓄发电单元的动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)。DVR 以光蓄发电单元为储能单元, 通过整流器串联接入到低压配电网与微电网公共连接处。提出了 DVR 的动态电压恢复方式、不间断供电方式和微电源方式的 3 种运行模式。通过对系统开关信号进行合理控制, 实现 3 种模式的有效切换, 提高 DVR 设备的利用率。DVR 的动态电压恢复

方式可有效抑制电压暂降或骤升, 改善微电网电压质量; 不间断供电方式可提高对负荷的供电可靠性; 微电源方式可以减少主网的电能供给, 实现节能减排。算例结果验证了 DVR 的有效性。

关键词: 动态电压恢复器; 微电网; 电能质量; 电压质量; 节能减排

0 引言

虽然微电网技术具有诸多优点, 但微电网中随机性能源(太阳能、风能)会对微电网电能质量产生或多或少的的影响; 同时微电网一般处于配电网的末端, 极易受电网电压暂态、跌落、瞬间中断及其他扰动的影响^[1-3]。目前最常用的改善动态电能质量的有效装置是电压源型动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)^[4-6]。

文献[7-8]分别提出采用超级电容器储能和飞轮储能装置储能的 DVR, 但仅用于解决配电网电压跌落。文献[9]采用光伏发电储能的 DVR, 实现动态电压恢复方式, 但由于太阳光具有很大随机性, 限制了设备的补偿能力。文献[10]采用模糊控制器实现 DVR 在低压配电网中的动态电压恢复与不间断供电方式以提高 DVR 利用率。

文献[11-13]分别提出利用逆变式微电源配合 DVR 补偿微电网电压暂降的策略和加装串联补偿器以提高电能质量, 有效增大了 DVR 的补偿范围, 但 DVR 在系统正常运行时处于备用状态, 设备的利用率较低。

为有效解决微电网存在的电压质量问题, 提高动态电压恢复器的利用率, 本文借助于动态电压恢复器的结构, 对用户安装的光伏发电和蓄电池储能

基金项目: 国家国际科技交流与合作专项(2010DFB63200)。

Special Fund for International S&T Cooperation Projects of China (2010DFB63200)。

混合发电系统进行改造,建立基于光蓄发电单元的动态电压恢复器。与传统的 DVR 相比,其所需的蓄电池容量小,能有效控制直流侧电压稳定;保证在电网电压跌落严重的情况下,逆变器仍能正常工作,延长补偿时间,从而提高 DVR 补偿能力。同时,通过将光蓄相结合作为微电网的微电源,可以充分发挥两者的优势^[14]。

1 基于光蓄发电单元的 DVR 结构

基于光蓄发电单元的动态电压恢复器串联接入低压配电网与微电网的公共连接点处,其结构如图 1 所示。

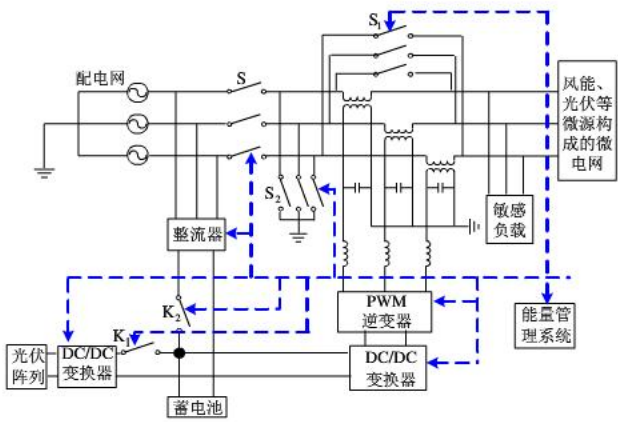


图 1 基于光蓄发电单元的动态电压恢复器结构
Fig. 1 Layout of DVR based on a photovoltaic/battery hybrid system

该 DVR 系统有光伏(photovoltaic, PV)阵列、具有最大功率点跟踪功能的 DC/DC 变换器、蓄电池组、具有控制蓄电池充/放电功能的 DC/DC 变换器、脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)逆变器、串联变压器和整流器,以及功率半导体开关 S 、 S_1 、 S_2 和 K_1 、 K_2 。图 1 中, U_s 为等效电源电压(变压器低压侧向配电网侧看入),即配电网电压; S 为静态开关用于微电网与配电网的分隔; S_1 、 S_2 为双向功率半导体开关(此类开关能够流过正、负方向的电流,也能限制正、负极性的电压)^[9],通过控制这些开关的逻辑信号实现该系统的不同运行模式的切换; K_1 、 K_2 用于控制蓄电池的充电途径,即由大电网或光伏发电单元充电。

2 系统运行模式

2.1 dq 检测方法

基于光蓄发电单元的动态电压恢复器结合了 DVR 和光蓄发电单元的优点,可以工作在动态电压

恢复方式、不间断供电方式和微电源方式 3 种运行模式。各运行方式的开关状态如表 1 所示。

表 1 不同运行方式下控制开关逻辑信号
Tab. 1 Logical signals of control switches in different operation modes

微网模式	测点电压/V	光照强度	开关逻辑信号 (“1”为闭合,“0”为断开)			运行方式	蓄电池模式
			S	S_1	S_2		
	220	不足	1	1	0	正常运行	充电
		充足	0	0	0	微电源	充电
并网	$\neq 220$ 且 $\neq 0$	—	1	0	0	动态电压恢复	放电
	0	—	0	0	1	不间断供电	放电
	220	不足	0	1	1	正常运行	充电
		充足	0	0	0	微电源	充电
孤岛	$\neq 220$ 且 $\neq 0$	—	0	0	0	动态电压恢复	放电
	0	—	0	0	0	不间断供电	放电

注:并网模式下,测点电压为配电网电压 U_s ;孤岛模式下,测点电压为微电网电压 U 。

为满足负荷对电能质量的要求,系统需具备快速检测的能力,能够实时、准确地检测电压的变化,从而更好地得到控制开关的逻辑信号。本文采用基于 dq 的检测方法,如图 2 所示。

检测配电网电压 U_s 或微电网电压 U ,通过派克变换得到 d 轴和 q 轴的检测结果,与参考值 U_d^* 和 U_q^* (三相电压对称且平衡时,派克变换后的 d 轴电压为 311 V, q 轴电压为 0,故取 d 轴参考电压 $U_d^*=311$ V 和 q 轴参考电压 $U_q^*=0$) 进行比较分析,判定测点电压的变化,通过能量管理系统控制开关的状态,明确 DVR 的运行模式。当电压质量出现问题需要补偿时,DVR 根据上述派克反变换得到的补偿指令电压控制逆变器输出,调节输出变压器电压 ΔU ,维持负载电压。

2.2 动态电压恢复方式

如图 2 所示,当检测到配电网电压 U_s 或微电网电压 U 发生电压暂降或暂升时,DVR 运行于动态电压恢复方式,通过电压补偿算法控制蓄电池放电,补偿敏感负载所需功率,保证其不受系统电源电压异常的影响,维持负载电压在额定值。因此,需根据负荷对电能质量的不同需求,对 DVR 采取合理的补偿策略,从而实现负载电压质量的提高。由于本文研究的敏感负载一般只要求电压幅值恒定,对相位无要求,故通过同相位补偿控制策略^[15-16]对其电压波形变化进行补偿,DVR 的注入电压可表

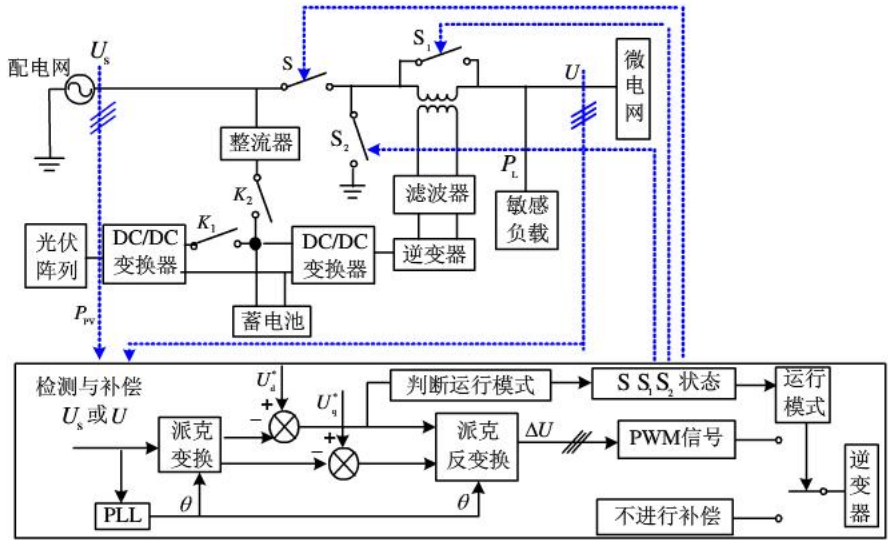


图 2 系统检测方法 & 运行模式的切换
Fig. 2 detection method and operation modes change

示为

$$U_{DVR} = \Delta U \text{ 且 } \angle U_{DVR} = \theta$$
$$\Delta U = |U_o| - |U_{sag}| \text{ 或 } \Delta U = |U_{swell}| - |U_o|$$

式中： U_{DVR} 为动态电压恢复器注入电压； ΔU 为补偿电压； U_o 为正常运行时系统电压； θ 为正常运行时系统相角； U_{sag} 为暂降后电压； U_{swell} 为骤升后电压。

通过采取上述补偿策略，并不足以实现对负荷很好的跟随性，作为 DVR 的核心部件的逆变器，其控制策略直接影响着 DVR 的动态性能。为了准确地实现系统电压的补偿，本文采用如图 3 所示的复合控制策略，前馈控制部分采用电网电压作为前馈信号，保证系统能够快速响应，反馈控制以负载电压为反馈信号，通过瞬时电压比例积分控制消除稳态误差。

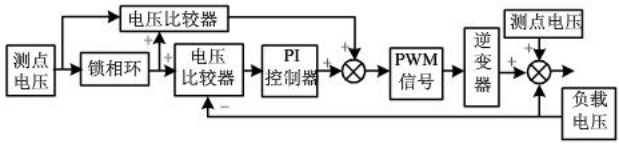


图 3 DVR 控制框图
Fig. 3 Control diagram of DVR

2.3 不间断供电方式

图 4 为 DVR 不间断供电方式的功率传输路径。如图 4 所示，微电网并网运行时，基于光蓄发电单元的 DVR 运行于不间断供电方式，旁路开关 S_1 断开，电网电压分两条支路运行，既给负载供电，又通过整流器给蓄电池组充电，以保证蓄电池组抑制电压变化的能力。微电网孤岛运行时，基于光蓄发

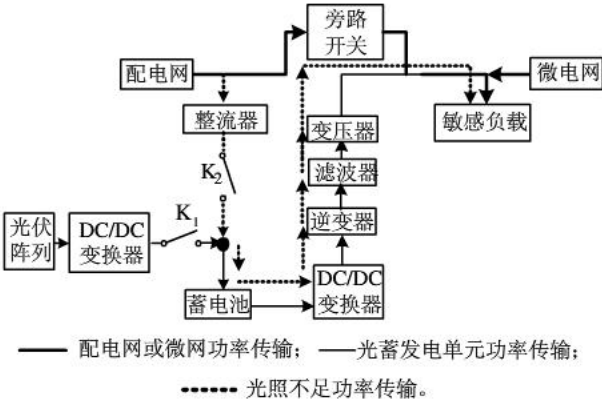


图 4 UPS 工作模式功率传输
Fig. 4 Power flow as a online UPS

电单元的 DVR 实现不间断供电方式，当 DVR 内的逻辑电路检测到电网断电时，采用与动态电压恢复方式相同的控制策略，蓄电池通过逆变器将直流电转换为交流电，提高负载的电压质量。

2.4 微电源方式

微电网并网正常运行时，旁路开关 S_1 处于闭合状态，DVR 工作在旁路模式，不发挥作用。当光蓄发电单元输出功率大于负荷需求，则微电网与主网断开，进入孤岛运行模式，如图 4 所示。此时光蓄发电单元可作为微电网的微电源运行，既可与微电网协调给负载供电，又可将多余的能量通过蓄电池进行存储，向系统提供必要的有功支持，更好地确保本文提出的 DVR 在电压暂降、暂升及中断情况下，负荷仍能够正常运行，保证负荷的供电质量。

综上所述，DVR 运行方式切换的有效性取决于蓄电池储存的电，需合理控制蓄电池内部的电

能。蓄电池充/放流程为：光照充足条件下，太阳能电池板发出的多余电能可给蓄电池充电，保证其实时改善微电网出现的电压质量问题；光照不足时，在电网给负载供电的同时需要对蓄电池进行充电，随时准备抑制电压的变化。

蓄电池充/放电途径控制如图5所示。图5中SOC为蓄电池荷电状态。

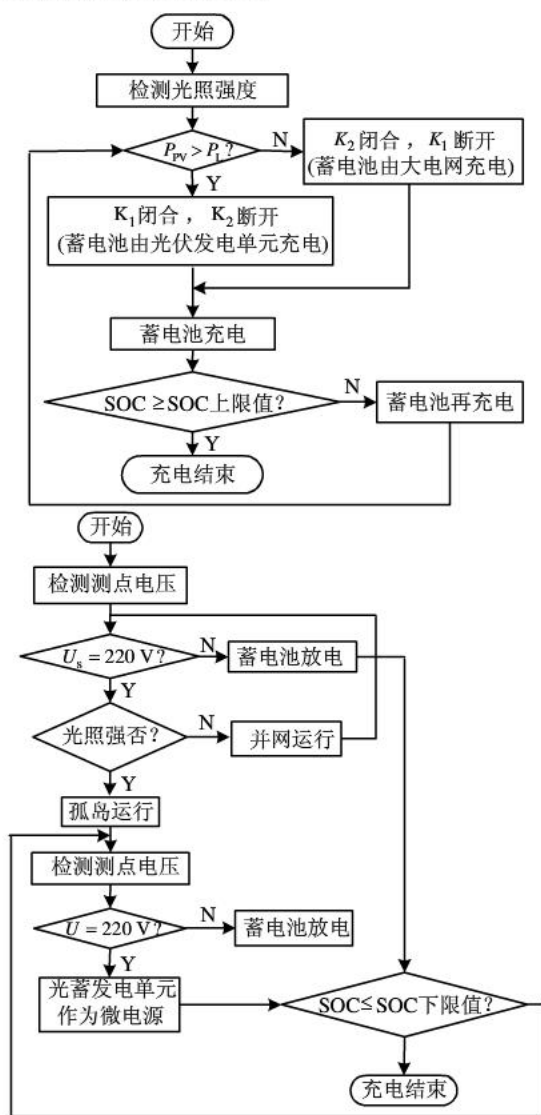


图5 蓄电池充/放电控制流程图

Fig. 5 Flow chart of charging/discharging battery

3 仿真研究

为研究上述系统运行模式切换及控制策略的正确性与可行性，本文基于 Matlab /Simulink 软件建立图1所示系统模型，进行仿真研究。DVR 主要参数如下：配电网电压和微电网电压为 220 V；系统频率为 50 Hz；串联变压器变比为 1；滤波电感和电容分别为 8 mH、100 μF；负载采用阻感性负载，电阻为 20 Ω，电感为 10 mH。

本文分3种情况进行讨论：

1) 电压暂降或骤升。

0~0.05 s，微电网正常运行，基于光蓄发电单元的 DVR 不工作，运行于旁路模式。0.05 s 时电网电压发生动态电压暂降，电压跌落到 154 V；0.1 s 电压恢复；0.15 s 时电网电压骤升，骤升为 264 V，持续 0.05 s 后电压恢复。电压波形变化如图6所示。

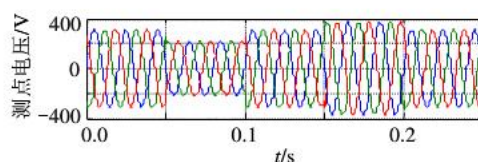


图6 测点电压(1)

Fig. 6 Voltage of monitoring point (1)

图7为检测产生的补偿指令电压，图8为 DVR 输出的实际电压。对比图7和8可知，DVR 能够跟随补偿指令电压，输出所需的补偿电压，验证了检测方法的有效性。

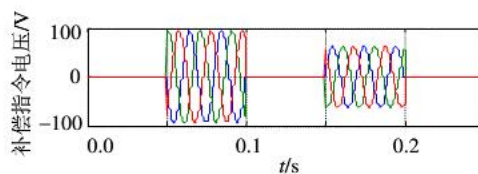


图7 补偿指令电压

Fig. 7 Compensation voltage

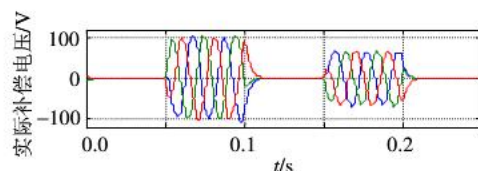


图8 DVR 输出电压(1)

Fig. 8 Output voltage of DVR (1)

图9为电压跌落或骤升时负载电压波形，可以看出，DVR 能够实时补偿电压暂降或骤升，实现负载的连续、可靠运行。

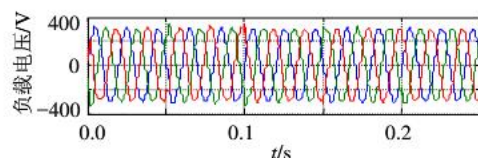


图9 补偿后负载电压(1)

Fig. 9 Load voltage after compensation (1)

2) 电网电压供电中断。

初始时微电网正常运行，0.05 s 后发生严重故障，导致供电中断，经过 0.15 s 电压恢复，电压动态变化如图10所示。图11为 DVR 输出电压波形，图12为经过补偿后的负载电压波形。图11、12表明：发生供电中断时，DVR 迅速作为不间断电源运

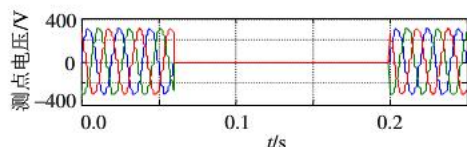


图 10 测点电压(2)

Fig. 10 Voltage of monitoring point (2)

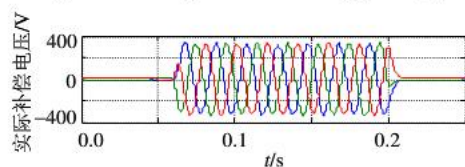


图 11 DVR 输出电压(2)

Fig. 11 Output voltage of DVR (2)

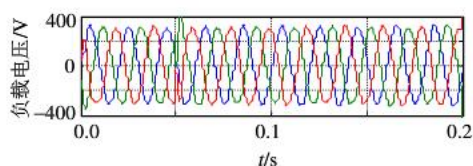


图 12 补偿后负载电压(2)

Fig. 12 Load voltage after compensation(2)

行, 输出补偿电压; 负载侧电压幅值基本没有发生畸变, 可见本文提出的 DVR 可有效地对供电中断进行补偿。

3) 光照充足且能够满足负荷需求。

当检测到光伏发电足以满足负荷需求时, 负荷不需要大电网供电, 仅通过光蓄发电单元作为微电源即可实现供电, 大电网电压波形和光蓄发电单元输出交流电压波形分别如图 13、14 所示。图 15 为微电源模式下的负载电压波形, 由图 15 可以看出, 光伏阵列或蓄电池可以作为微电源, 输出负载所需电压, 减少大电网的投入, 节约能源。

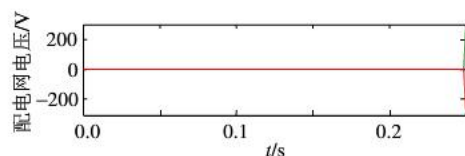


图 13 系统不供电电压波形

Fig. 13 System voltage when stopping supply

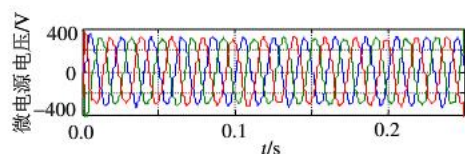


图 14 DVR 输出电压(微电源方式)

Fig. 14 Output voltage under micro-source mode

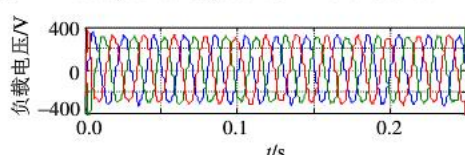


图 15 负载电压(微电源方式)

Fig. 15 Load voltage under micro-source mode

4 结论

1) 将基于光蓄发电单元的 DVR 串联接入微电网, 能有效抑制电压跌落或电压骤升, 改善微电网电能质量, 提高供电可靠性。

2) 在光照充足条件下, DVR 可作为微电源为负荷供电, 减少了主网的电能输出, 使太阳能得到充分利用, 实现了节能减排。

3) 该 DVR 减少了原有 DVR 的备用状态, 大大提高了设备的利用率。

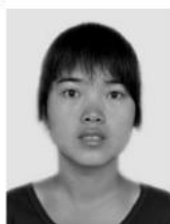
致谢

本文得到了“山西省高等学校中青年拔尖创新人才支持计划资助”的资助, 特此致谢!

参考文献

- [1] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
Zheng Zhanghua, Ai Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31(in Chinese).
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107(in Chinese).
- [3] 赵宏伟, 吴涛涛. 基于分布式电源的微网技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 121-128.
Zhao Hongwei, Wu Taotao. Review of distributed generation based microgrid technology[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Its Automation, 2008, 20(1): 121-128(in Chinese).
- [4] 石游, 杨洪耕. 带谐波补偿功能的动态电压补偿器[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 36-40.
Shi You, Yang Honggeng. A dynamic voltage restorer with harmonic compensation function[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 36-40(in Chinese).
- [5] 周雪松, 张智勇, 马幼捷. 级联动态电压恢复器的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 74-77.
Zhou Xuesong, Zhang Zhiyong, Ma Youjie. Study on interline dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 74-77(in Chinese).
- [6] 王凯斐, 李彦栋, 卓放, 等. 一种可持续补偿三相动态电压恢复器的研究[J]. 电力电子技术, 2004, 1(38): 1-3.
Wang Kaifei, Li Yandong, Zhuo Fang, et al. An unremitting dynamic voltage restorer [J]. Power Electronics, 2004, 1(38): 1-3(in Chinese).
- [7] 王云玲, 曾杰, 张步涵, 等. 基于超级电容器储能系统的动态电压调节器[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 58-62.
Wang Yunling, Zeng Jie, Zhang Buhan, et al. Dynamic voltage conditioner based on ultracapacitor energy storage system[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 58-62(in Chinese).
- [8] 周龙, 齐智平. 解决配电网电压暂降问题的飞轮储能单元建模与仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 152-158.

- Zhou Long, Qi Zhiping. Modeling and simulation of flywheel energy storage unit for voltage sag in distribution network[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 152-158(in Chinese).
- [9] Ashari M, Hiyama T, Pujiantara M, et al. A novel dynamic voltage restorer with outage handling capability using fuzzy logic controller[C]//2nd International Conference on Innovative Computing, Information and Control(ICICIC 2007). Kumamoto, Japan: ICICIC 2007, 2007: 51-54.
- [10] Al-Mathnani A O, Mohamed A, Ali-Mohd A M. Photovoltaic based dynamic voltage restorer for voltage sag mitigation[C]//The 5th Student Conference on Research and Development. Selangor, Malaysia: IEEE, 2007: 119-124.
- [11] 雷之力, 艾欣, 崔明勇. 微网电压暂降串并联协调补偿策略[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2010, 37(5): 1-5.
Lei Zhili, Ai Xin, Cui Mingyong. Coordinated control strategy of series and shunt compensation of voltage sag in microgrid[J]. Journal of North China Electric Power University, Natural Science Edition, 2010, 37(5): 1-5(in Chinese).
- [12] 刘艳, 艾欣, 雷之力. DVR 和逆变式微电源配合补偿微电网中电压暂降问题的研究[J]. 现代电力, 2009, 26(3): 13-18.
Liu Yan, Ai Xin, Lei Zhili. Compensating voltage sags in microgrid using dynamic voltage restorer and inverter microsource[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(3): 13-18(in Chinese).
- [13] 李勇汇, 吕艳萍, 彭辉, 等. 一种基于分布式电源的串联补偿方式的设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 158-164.
Li Yonghui, Lü Yanping, Peng Hui, et al. Design of a series compensation scheme based on distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 158-164(in Chinese).
- [14] 罗隆福, 黎涛, 邓建国, 等. 储能型光伏系统功率控制仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 87-91.
Luo Longfu, Li Tao, Deng Jianguo, et al. Simulation analysis for constant power control of photovoltaic system with battery energy storage[J]. Power System and its Automation, 2011, 23(6): 87-91(in Chinese).
- [15] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
Zhou Hui, Qi Zhiping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 23-29(in Chinese).
- [16] Mahinda V D, Perera A A D, Choi S S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 3(18): 928-936.



成瑞芬

收稿日期: 2012-08-24。

作者简介:

成瑞芬(1986), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网电能质量分析与控制, E-mail: chengruifen@163.com;

韩肖清(1964), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、成瑞芬微电网及新能源技术;

王鹏(1955), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统可靠性规划和运行、微电网及新能源技术。

(责任编辑 徐梅)