

中压大功率电压暂降综合治理装置 工业可行性方案研究

张华赢¹, 张少杰², 余鹏¹, 姚森敬¹, 黄志伟¹,
史帅彬¹, 胡子珩¹, 王淼², 曹军威²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东省 深圳市 518020;
2. 清华大学信息技术研究院, 北京市 海淀区 100084)

Industrial Feasibility of Medium-voltage High-power Comprehensive Treatment Device for Voltage Sags

ZHANG Huaying¹, ZHANG Shaojie², YU Peng¹, YAO Senjing¹, HUANG Zhiwei¹, SHI Shuaibin¹,
HU Ziheng¹, WANG Miao², CAO Junwei²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd, Shenzhen 518020, Guangdong Province, China;
2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Power quality (PQ) has become a key problem of urban power grid recently. Improving power quality is a technical problem being concerned by both power supply companies and the consumers. Shenzhen power grid, as a typical urban power grid, is exemplified in this paper. Through researches, typical PQ issues of a key region in urban power grid are discussed. Industrial feasibility study is carried out on medium-voltage high-power comprehensive treatment device for solving voltage sags problems in regional power grids. Based on the statistical analysis of PQ monitoring data of Shenzhen power grid in the recent three years, a medium-voltage high-power PQ regulator is designed. Simulation experiments are carried out using PSCAD simulation software, and these experiments show that the device can effectively solve the PQ issues of regional power grids. This design scheme is exploratory and instructive for improving regional power quality in urban power grid.

KEY WORDS: power quality (PQ); comprehensive treatment; regional power grid; voltage sags; dynamic voltage restorer

摘要: 电能质量是城市电网面临的突出问题,提升电能质量是供电企业和电力客户共同关心的技术难题。以深圳电网这一典型城市电网为例,通过调研,分析城市电网重点区域的电能质量问题,研究应用于解决区域电网电压暂降的中压大功率综合治理装置工业可行性方案。结合深圳电网近3年电能质量监测数据的统计分析,完成中压大功率电能质量调节器设计,并利用PSCAD仿真软件进行仿真验证。实验表明,中压大功率电压暂降综合治理装置可有效解决区域电网的电能质量问题,所提出的设计方案对城市电网区域电能质量治理具有积极的指导意义。

关键词: 电能质量; 综合治理; 区域电网; 电压暂降; 动态电压恢复器

0 引言

时至今日,随着工业经济的大规模发展,大容

量、高精度的工业产品应用越来越多,其对电网的应用要求也越来越高。电能质量问题也越来越受到人们的重视,电能质量问题造成的最直接问题就是工业正常生产被破坏,进而带来巨大经济损失。例如:对敏感用户(如半导体制造企业)而言,几十毫秒的电压暂降就可能设备损坏、生产线停产,造成巨大经济损失。现正值我国工业经济飞速发展的黄金时期,电能质量关乎整个工业过程中产品的发展水平和竞争实力,如计算机、信息设备、精密

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2013CB228206); 国家自然科学基金项目(61233016); 南网电网公司科技项目(K-SZ2012-026)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB228206); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61233016); Project Supported by China Southern Power Grid Company (K-SZ2012-026).

仪器、高端制造业等。所以，电能质量问题不仅是电网技术问题，更关系到整个国民经济的总体效益。

深圳作为高新技术产业集散地，是全国第4个负荷过千万千瓦的城市，全市的用电量甚至可与一个普通省份用电量相当，在这2 020 km²的土地上承载了1 315万kW的负荷，而这其中大部分为高新技术企业。

在深圳电网电能质量问题中，以电压暂降和短时中断故障居多。以深圳某中心站为例，在2010—2012这3年间，共发生374次电压暂降和中断事件，单日最高次达60多次。在电压暂升故障中，原因也多是由于三相中的某一相或某两相与地短接引起的。所以经研究分析可知：目前包括深圳在内的珠三角地区的电能质量问题主要集中在电压暂降导致低压脱扣，区域治理以电压调节为主，以保持负载电压稳定。

现在，电能质量治理装置种类很多，相关文献也有很多^[1]。根据深圳该中心站这一区域的故障特点，以动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)为基础进行中压大功率电压暂降综合治理装置的方案设计。随着技术的不断进步和应用的增多，DVR产品和生产厂家也陆续在市场出现；但其价格较高，体积较大，使用不够灵活^[2]。现有DVR主要针对电网侧敏感性用户等某一终端点而

言，国内DVR产品容量较小，且用于低电压等级，尚无适应于区域性、规模性中压大容量电能质量的综合治理装置产品。为实现电能质量区域性的治理和改善，本文以深圳某中心站下有典型故障记录的某单位为区域范围，对中压大功率电能质量综合治理装置工业可行性进行方案研究，为进一步探索电能质量区域综合治理研究与工程示范提供理论指导。

1 治理装置功能结构分析

DVR按功能分，主要包括供电系统、逆变单元、滤波单元、连接系统。根据各组成部分的结构和形式，DVR总体结构形式多样，种类繁多。但究其各种形式，供电系统普遍采用“储能装置”，造价高，占地大，控制复杂，关键是目前DVR产品大都是低压产品。深圳某区域电网出线电压10 kV，电压暂降、短路、闪变居多，要求电能质量治理装置快速、灵活、有效，所以，在本方案中采用图1所示的DVR结构形式。由图1可知，本DVR主要结构由单路输入多路输出工频变压器、不控整流系统、三单相H桥级联结构逆变单元、LC滤波器、反并联单向晶闸管切入切除电路等部分组成。该结构具有反应迅速、保护可靠、运行效能高和市场应用前景广等特点。

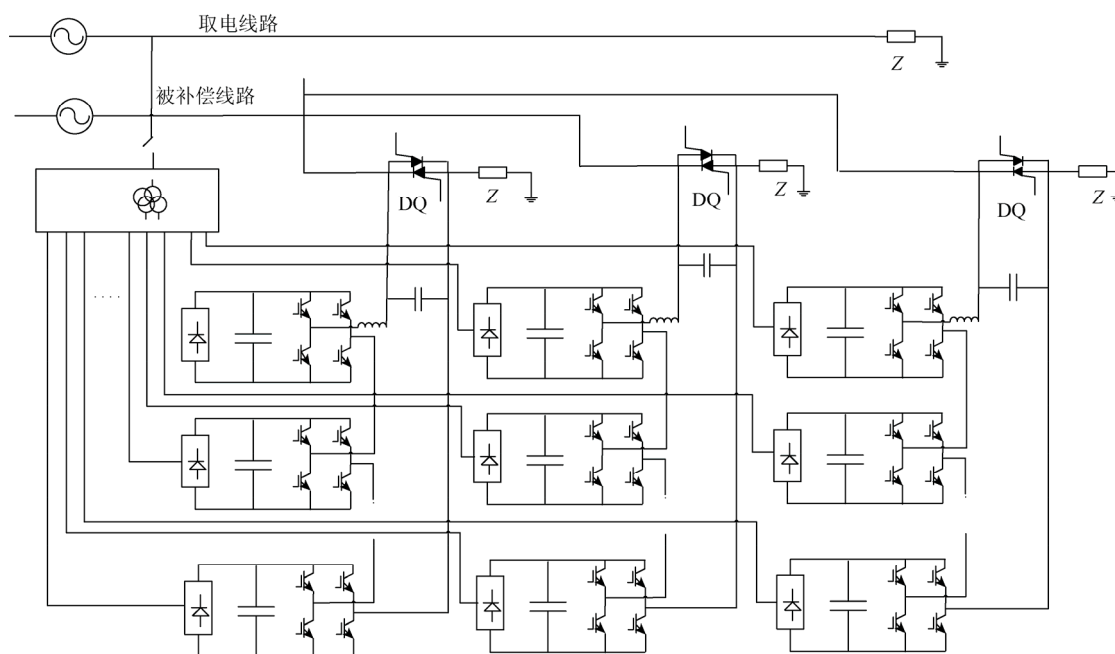


图1 DVR系统原理图
Fig. 1 Principle diagram of DVR system

2 治理装置工业性研究

2.1 供电系统

DVR 供电系统一般采用“储能”形式,如蓄电池储能、超级电容储能、飞轮储能、超导储能等^[3]。蓄电池虽技术成熟、能量稳定;但存在造价高、充电慢等缺点^[4-5],还存在重金属污染^[6]。超级电容器克服了蓄电池的许多缺点,应用也越来越广;可价格较高,应用复杂^[7-9]。飞轮储能也具有充放电快速等优点^[10];但功率密度非常低,结构复杂^[11-12]。超导储能具有能量转换效率高、响应速度快、无污染和使用寿命长等特点,但是成本仍然较高^[13]。

鉴于以上各物理储能系统的缺点,本文供电系统采用自供电方式。即:采用电网系统“被补偿线路”之外的母线供电,然后经单输入多输出变压器隔离降压,再经不控整流器整流,形成供电系统。该供电系统省去了物理储能系统,价格和占地面积较之明显降低。各组成部分,市场上产品选择范围较广,工业化程度高;且这种结构可以持续提供能量,此外,发生单相电压暂降故障时,其余两相可以提供能量。这种结构采用的不控整流电路存在以下缺点:在降低直流电容量时,会产生 100 Hz 的低频纹波;且提供单方向能量,不可解决能量双向流动和电压浪涌等问题。在故障统计分析中,有少部分故障为电压暂升,为解决这些问题,有文献提出采用正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)整流器,但 SPWM 整流器控制复杂,成本增大。本文采取电容和 DC-DC 双向变流器方案:DC-DC 双向变流器在电压暂降或闪变时不工作;而在升压突变,有能量回流时启动,且用与之并联的电容吸收。

2.2 拓扑结构及功率元件选择

2.2.1 逆变器结构

电能质量治理装置中 DVR 的逆变器结构主要有三相四线制半桥结构、三相四桥臂结构和三单相 H 桥结构 3 种^[14]。三相四线制半桥结构需直流电容量大,电压不易平衡,补偿电压偏移给定值降低了补偿效果^[15];三相四桥臂结构虽然补偿效果较三相四线制半桥结构理想,但实现独立控制很难,不易单相补偿^[16]。这 2 种结构在功率开关管导通后,装置与电网之间经滤波电感连接到一点,三相负载电压也可能因公共桥臂中某一开关管导通而连接,装置需通过耦合变压器和系统相连。三单相 H 桥结

构桥间不耦合,易独立控制,不存在相间短路的情况。非对称电压故障中,存在负序和零序电压,治理装置不仅要补偿电压暂降,也要补偿电压的不对称^[17-18]。三单相逆变器既可以补偿三相电压故障,又可补偿单相电压暂降,平衡三相电压,在本系统使用时采用三单相逆变器更具工业特性。

2.2.2 功率元件选择

目前,功率开关管在大功率应用中主要有绝缘栅双极型晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)、集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristors, IGCT)和电子注入增强门极晶体管(injection enhanced gate transistor, IEGT)等。比较各功率管特点,IGBT 市场价格适中,技术成熟,生产厂家众多,适合生产工业化产品。在此,IGBT 功率模块参数常用为 600 A/1 700 V。所以,为达到系统要求可采用混联结构,即由多个 IGBT 构成一个单元,再由 4 个这样的单元组成 H 桥,然后多 H 桥模块级联。应用混联技术,可使功率开关效能比进一步增加^[19-20]。

2.3 电压注入系统

补偿装置电压的注入多采用串联变压器,但设计复杂,成本高,占地面积大^[21],其过饱和会引起激磁涌流和电压畸变,放大输出滤波器带来的相移和压降,产生功耗,影响补偿性能^[22-23]。此外,串联变压器的短路阻抗会降低开环控制电压精度和电压暂降时的瞬间涌流,对补偿效果有影响^[24]。近来也有许多研究提出采取直挂的方法,即装置用滤波器直接和电网相连,在输入侧串接一工频变压器,这种结构设计简单,控制灵活,工作可靠。

2.4 旁路切入切除

在 DVR 的切入切除方式应用中,现普遍采用两互相反向的晶闸管切入切除方式,这种方式结构简单,技术成熟可靠,响应速度快,目前市场 DVR 产品大多采用该方式^[25]。DVR 的切入切除系统主要功能为保护和注入电压,结构如图 2 所示。

较传统的机械转换开关需 20~40 ms 的反应时间,反相并联的晶闸管的切除方式在 1 ms 之内就可完成切换过程。旁路刀闸采用交流接触器,其控制容量大,工作可靠,寿命长。

两互相反向的晶闸管切入切除方式工作原理和过程参照图 2,当装置发生过流、短路等故障时,

旁路刀闸闭合，DVR 被旁路切除，可达到短路保护的的目的^[26]。另外，每相整流器的输入端分别与另外两相相连，这提高了系统补偿单相干扰的能力^[27]。

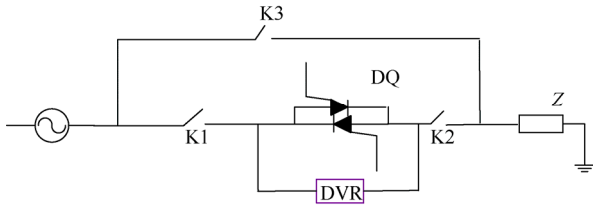


图 2 DVR 切入切除系统

Fig. 2 DVR pitching-in and drop out system

2.5 连接电路

根据前文分析，逆变器输出侧加装电抗器和耦合电容一起构成滤波器。其设计基本原则是对高次谐波产生较大衰减，但对低频(尤其是 50 Hz 频率)衰减尽可能小。在 DVR 滤波装置设计中为达到较好的滤波效果，滤波器谐振频率 f_c 需满足： $10f_1 < f_c < f_s/10$ ， f_1 为电网基波频率， f_s 为脉宽调制的载波频率^[28]。

滤波器设计采用巴特沃思低通滤波器，计算过

程采用归一化处理。经计算，LC 滤波器的电感容量为 112.5 mH；电容容量为 47 μ F(45 μ F，取标准值 47 μ F)。

谐振频率计算如下：

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{112.5 \times 47 \times 10^{-9}}} \text{ Hz} = 70 \text{ Hz}$$

通常谐振频率小于截止频率，即 $f_c(70 \text{ Hz}) < f(100 \text{ Hz})$ ，两者取值合适。

3 仿真分析

根据以上理论分析和结构研究，本文对深圳某站下有典型故障记录的某区域故障，用 PSCAD 进行仿真试验。在该区域故障统计中最多的是电压暂降和短路接地，且 80% 以上的短路故障是单相短路，所以，在此对电压暂降和单相对地短路故障进行仿真。根据项目的研究分析数据，该区域三相电压暂降 70% 的故障最多，且危害最大。图 3 为某一时刻三相电压暂降 30% 的录波分析图，图中最低电压平均幅值为正常电压的 68.86%，变动最大持续时间为 380 ms。

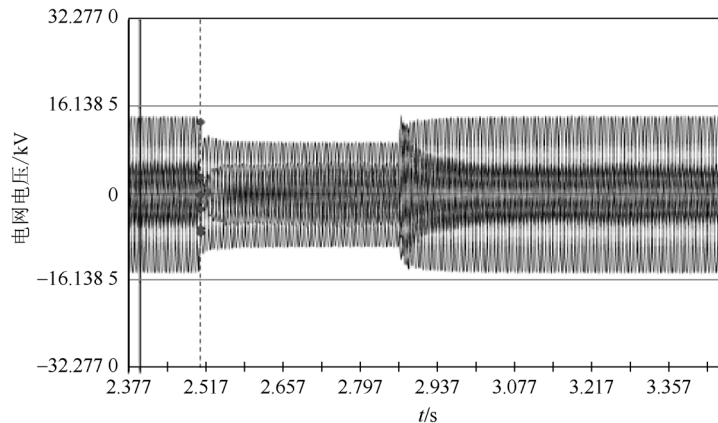


图 3 三相电压暂降 30% 时的录波图

Fig. 3 Waveform recorded diagram of three-phase voltage sag by 30 percent

由图 3 可以看出：在电压暂降的起始和结束时刻，有电压抖动和暂升，暂降过程中三相同步降低；故障结束时，系统并没有马上恢复，而是有一明显的调整期。据此，搭建故障模型和治理模型。在 PSCAD 中，用 10 kV/20 MVA 的电源作电网系统，用故障逻辑模块作故障源，分别产生单相和三相故障，故障持续 1 s；用电阻等效负载，取值 1 Ω 。在此，采用完全补偿策略。图 4、5 分别是电压暂降 30% 和加了补偿装置的负载端电压波形。图 4 为故障仿真波形，从波形中可看出，在故障结束时波形

和录波有差别，原因是两者负载有差别，通过调整等效阻抗可解决，补偿时可使用相应的补偿策略，不影响补偿装置的补偿效果。图 5 为加了补偿装置的电压波形。从图 5 中可看出，补偿电压幅值、相位和无故障时无异，只是在退出时，有抖动现象，在以后的研究中需要优化电压补偿策略。对幅值和相位连续性要求高的负荷，可用暂降前电压补偿法；反之，可采用同相电压补偿法或最小能量补偿法。

图 6、7 分别为单相与地短接时的故障电压波形和加了治理装置的电压波形。

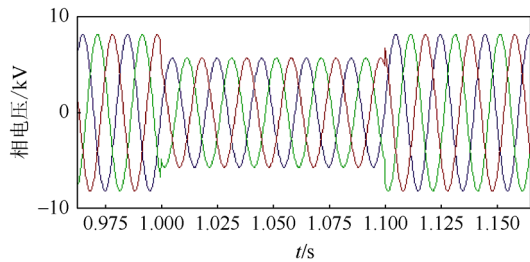


图4 三相暂降30%后的电压波形

Fig. 4 Simulation waveform of three-phase voltage sag by 30 percent

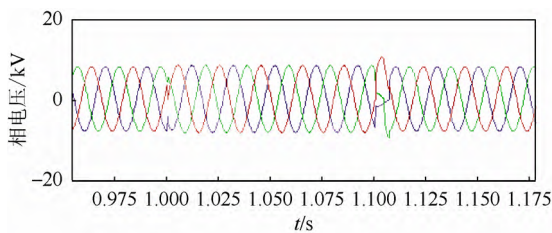


图5 三相暂降30%补偿后的电压波形

Fig. 5 Compensated waveform of three-phase voltage sag by 30 percent

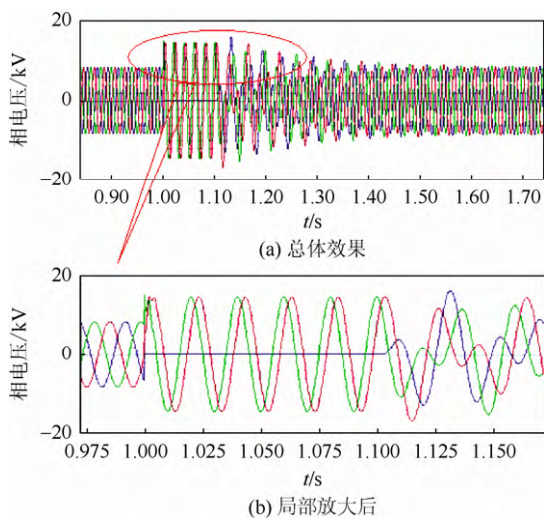


图6 A相接地后电压波形

Fig. 6 A phase short circuit voltage waveform

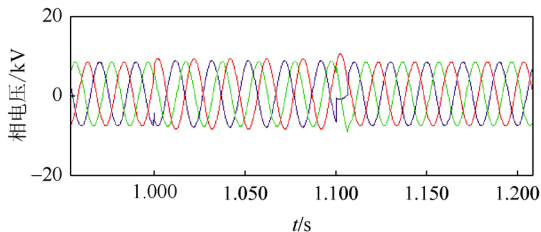


图7 A相与地短时补偿后的电压波形

Fig. 7 A phase short circuit voltage waveform with compensation

从图6中可看出,在单相电压暂降时,另外两相电压暂升,且伴有移相现象。所以在进行电压补

偿时,既要电压进行补偿,又要补偿相位。分析图7所示的单相电压暂降时电压补偿后的波形可见,电压恢复到了暂降前的负载电压;只是在电压补偿过程中,三相两两之间相位稍不平衡,这是由于在补偿相位计算过程中,精度不够,需提高精度或改进控制策略。

综上,通过仿真验证,电能质量综合治理装置能够解决深圳某站下某区域电压暂降、短路等故障问题。

4 结论

本文设计的中压大功率区域性电能质量综合治理装置,经研究仿真表明:在故障发生时,区域电能质量治理可以及时启动,并为系统注入所需电压,使该区域负载用户不受电压暂降、短路等故障影响,避免了经济损失。所以,中压大功率区域性电能质量综合质量装置基本满足在这一典型区域的使用要求。本文结合深圳电网电能质量电压暂降的具体问题,将DVR用于区域电能质量治理,并设计了中压大容量综合治理装置;同时,本文设计方案将对应用于区域电网的中压大功率电压暂降综合治理装置设计和工程示范具有积极的探索和指导意义。

参考文献

- [1] 黄乐, 聂一雄. 动态电压恢复器研究综述[J]. 惠州学院学报, 2012, 32(3): 77-81.
Huang Le, Nie Yixiong. Review and research on dynamic voltage restorer[J]. Journal of Huizhou University, 2012, 32(3): 77-81(in Chinese).
- [2] 中国工控网. 几种动态电压恢复器(DVR)的对比分析[EB/OL]. [2008-12-18]. <http://www.cheminfo.gov.cn/HezuoPage/gongkong.aspx?code=cheminfo&action=detail&type=Paper&infol=2008121811324100004>.
- [3] Tiwari H P, Gupta S K. DC energy storage schemes for DVR voltage sag mitigation system[J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2010, 2(3): 1793-8201.
- [4] 湖南省邮电管理局. 蓄电池的使用和维护[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1979.
- [5] 王洪礼, 何志琴, 李德菊. 超级电容器与蓄电池性能的比较分析[J]. 现代机械, 2013(3): 63-65.
Wang Hongli, He Zhiqin, Li Deju. The comparative analysis of super-capacitor and battery performance[J]. Modern Machinery, 2013(3): 63-65(in Chinese).
- [6] Urbain M, Rael S, Davat B, et al. State estimation of a lithiumion battery through Kalman filter[C]//Power Electronics Specialists Conference. Orlando, Florida, U.S.: IEEE, 2007.
- [7] 张强. 动态电压恢复器检测系统和充电装置技术的研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2006.
Zhang Qiang. Research on the test system and charging device of dynamic voltage regulator[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2006(in Chinese).

- [8] 唐西胜, 齐智平. 超级电容器蓄电池混合电源[J]. 电源技术, 2006, 30(11): 933-936.
Tang Xisheng, Qi Zhiping. Study on the ultracapacitor/battery hybrid system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(11): 933-936(in Chinese).
- [9] 范云宇. 动态电压恢复器的直流储能系统关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Fan Yunyu. Study on the key technologies of the DC storage energy system in DVR[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011(in Chinese).
- [10] 朱俊星, 李金元. 基于飞轮储能系统的动态电压恢复器[J]. 供电用, 2010, 27(2): 13-16.
Zhu Junxing, Li Jinyuan. The dynamic voltage restorer with flywheel energy storage system[J]. Distribution & Utilization, 2010, 27(2): 13-16(in Chinese).
- [11] 李永丽, 张惠智, 谈震, 等. 飞轮储能技术在电力系统中的应用[C]//第十三届中国科协年会第15分会场: 大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集, 天津, 2011: 1-6.
- [12] 戴兴建, 李奕良, 于涵. 高储能密度飞轮结构设计方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(3): 379-343.
Dai Xingjian, Li Yiliang, Yu Han. Design of high specific energy density flywheel[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(3): 379-343(in Chinese).
- [13] 郭风, 赵彩宏, 肖立业. 基于超导储能的动态电压补偿的研究[J]. 电气应用, 2005, 24(9): 84-86.
Guo Feng, Zhao Caihong, Xiao Liye. Research of DVR used for superconducting magnetic energy storage[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(9): 84-86(in Chinese).
- [14] 徐爱亲. 动态电压恢复器(DVR)系统建模及控制策略研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
Xu Aiqin. A survey on control strategy of DVR[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010(in Chinese).
- [15] Zhang R S. High performance power converter systems for nonlinear and unbalanced load/source[D]. Blacksburg, Virginia, U.S.: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [16] Chung Il-Yop, Park Sang-Young, Moon Seung-II, et al. The control and analysis of zero sequence components in DVR system[C]//Power Engineering Society Winter Meeting, University of Michigan, U.S., 2001: 1021-1026.
- [17] 杨潮, 韩英铎, 黄瀚, 等. 动态电压调节器串联补偿电压研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(5): 1-5.
Yang Chao, Han Yingduo, Huang Han, et al. Study on series compensating voltage in DVR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(5): 1-5(in Chinese).
- [18] 冯小明. 动态电压及恢复器理论及仿真研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Feng Xiaoming. Theory and simulation research on dynamic voltage restorer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005(in Chinese).
- [19] 刘早晨. 级联多电平动态电压恢复器补偿电压跌落技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Liu Zaocheng. Research of cascaded multilevel dynamic voltage restorer compensation technology for voltage sag[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010(in Chinese).
- [20] 何杰, 周雪松, 陈山中, 等. 链式动态电压恢复器的新型控制策略分析与设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 176-183.
He Jie, Zhou Xuesong, Chen Shanzhong, et al. New control strategy analysis of the cascaded dynamic voltage restorer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 176-183(in Chinese).
- [21] 陈国栋, 董祖毅, 蔡旭, 等. 动态电压恢复装置的拓扑结构[J]. 上海电气技术, 2013, 6(1): 1-7.
Chen Guodong, Dong Zuyi, Cai Xu, et al. A survey on topology of dynamic voltage restorer[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2013, 6(1): 1-7(in Chinese).
- [22] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [23] 尹忠东, 张卫华, 韩民晓. 动态电压恢复器注入变压器过饱和抑制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 28-31.
Yin Zhongdong, Zhang Weihua, Han Minxiao. Over-saturation suppression to dynamic voltage restorer in injection transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 28-31(in Chinese).
- [24] Mohammed S A, Abdel-Moamen M A, Hasanin B. Transformer-less dynamic voltage restorer for voltage sag compensation[J]. Automation and Systems, 2013, 2(2): 40-42.
- [25] Jain A, Bhullar S. Effectiveness of DVR to compensate the load voltage harmonics in distribution networks under various operating conditions (using FOC induction motor as load)[J]. International Journal of Advanced Research, 2013, 1(7): 349-357.
- [26] Gupta S K, Tiwari H P, Pachar R. Estimation of DC voltage storage requirements for dynamic voltage compensation on distribution network using DVR[J]. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 2010, 2(1): 1793-8236.
- [27] 李长伟. 一种新型动态电压跌落修正器[J]. 广东电力, 2007, 20(10): 60-64.
Li Changwei. A novel dynamic sag corrector[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(10): 60-64(in Chinese).
- [28] 蒋晓春, 周飞, 赵小英, 等. 动态电压恢复器启动瞬间谐振问题的研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 24-28.
Jiang Xiaochun, Zhou Fei, Zhao Xiaoying, et al. Research on resonance of startup transient for dynamic voltage restorer[J]. Power Electronics, 2010, 44(9): 24-28(in Chinese).

收稿日期: 2014-03-02.

作者简介:

张华赢(1981), 男, 硕士, 工程师, 从事高电压技术、电能质量综合治理技术研究;

张少杰(1982), 女, 硕士, 工程师, 从事电能质量和电力电子技术研究, zhangshaojie@sina.com;

余鹏(1981), 男, 硕士, 工程师, 从事电能质量检测治理和管理技术研究;

姚森敬(1969), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电能质量综合管理和高电压技术研究;

黄志伟(1972), 男, 博士, 高级工程师, 从事电能质量综合管理、配网自动化研究;

史帅彬(1983), 男, 硕士, 工程师, 从事电能质量监测治理和综合管理研究;

胡子珩(1963), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力调度、自动化技术管理和研究工作;

王焱(1977), 男, 硕士, 工程师, 从事电能质量监测分析及综合治理技术研究;

曹军威(1973), 男, 博士, 研究员, 从事分布式计算技术及其在能源电力行业的应用研究。

(责任编辑 谷子)