

动态电压恢复器控制策略研究综述

王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 沈月月

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 动态电压恢复器(DVR)是解决动态电压质量问题的主要手段,受到国内外电力研究者的广泛关注。为了推进动态电压恢复器控制策略的理论研究和实用化研制,在大量查阅国际会议、学术期刊等相关论文的基础上,对DVR的控制策略进行综述。对DVR的主要结构、相应工作原理和应用场合进行了归纳与比较。对DVR逆变器控制策略,包括前馈、反馈和复合型控制等线性控制方式,以及人工智能、模糊、无差拍、空间矢量等非线性控制方式进行总结。对DVR整流器常规的和新型的控制方式的原理、优缺点进行归纳和说明。最后提出动态电压恢复器研究中需要解决的若干问题。

关键词: 电能质量; 动态电压恢复器; 控制策略; 电压凹陷; 电力系统

A survey on control strategy of DVR

WANG Jing, XU Ai-qin, WENG Guo-qing, SHEN Yue-yue

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: As a main solution to deal with dynamic voltage problems, dynamic voltage restorer (DVR) catches power engineering scholars and researchers' more attentions. In order to develop the study of DVR control strategies and to propel DVR equipment applications, the paper details the survey of DVR control strategy by referring lots of DVR materials in conferences and science periodicals. Several kinds of DVR main structures and relevant operation principles, together with their operation conditions are discussed firstly. Then the control strategies of DVR inverter are summed up which include linear control methods (such as feed forward control, feed back control and multiplex control) and non-linear control method (such as AI, fuzzy, deadbeat control and vector control). Nevertheless, the theory, advantages and disadvantages of normal and latest control methods used on rectifier side are also presented. Finally, certain problems to be solved of DVR are proposed.

Key words: power quality; DVR; control strategy; voltage sag; power system

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0145-07

0 引言

20世纪90年代,电能质量问题成为研究的重点,其中电压凹陷成为影响电力负荷安全运行最突出的问题^[1]。

动态电压恢复器 DVR (Dynamic Voltage Restorer) 是目前解决电压凹陷问题最经济、有效的用户电力装置^[2]。自从西屋公司于1996年研制成功首台工业应用的DVR后,国外多家公司,如ABB、西门子等均开发出各自的相关产品^[3]。国内的高等院校和科研单位从1998年开始对DVR的结构^[4]、参数选择^[5]、检测^[6]、锁相^[7]、补偿控制策略^[8]等方

面进行研究。但至今为止,对DVR补偿控制策略的研究仍然方兴未艾。本文对DVR的控制策略和方法进行综述,并指明今后的发展方向和需要解决的若干问题。

1 DVR的基本结构和工作原理

DVR是一种串联型电能质量控制器。当电网电压 V_s 发生电压凹陷时,DVR向线路中注入一个幅值、相位可控的串联补偿电压 V_{dvr} ,以保证负荷电压恒定,如图1所示。

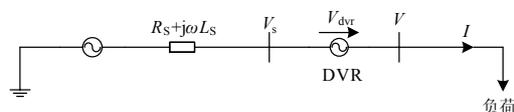


图1 简化原理图

Fig.1 Simplified schematic diagram

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y107210); 浙江工业大学信息学院教改项目专项基金(20070203)

目前DVR的基本结构主要有三种,应用于中低压配电网中保护敏感负荷免受电压凹陷的危害,如图2所示^[9-11]。

图2(a)所示为现已投入工业应用的串联型DVR。持续补偿电压凹陷的时间由直流储能单元的容量决定,受目前储能技术发展的影响,储能单元的价格与运行的维护费用较高。图2(b)所示为串并联混合型DVR,能够很好地弥补串联型DVR的不足。通过电网获取直流能量,对电压凹陷实现连续补偿。考虑到串联变压器成本较高,占地面积较大,且逆变器输出的高次谐波给变压器设计带来的困难,文献[11]给出串并联混合型DVR省去串联变压器的结构,如图2(c)所示。

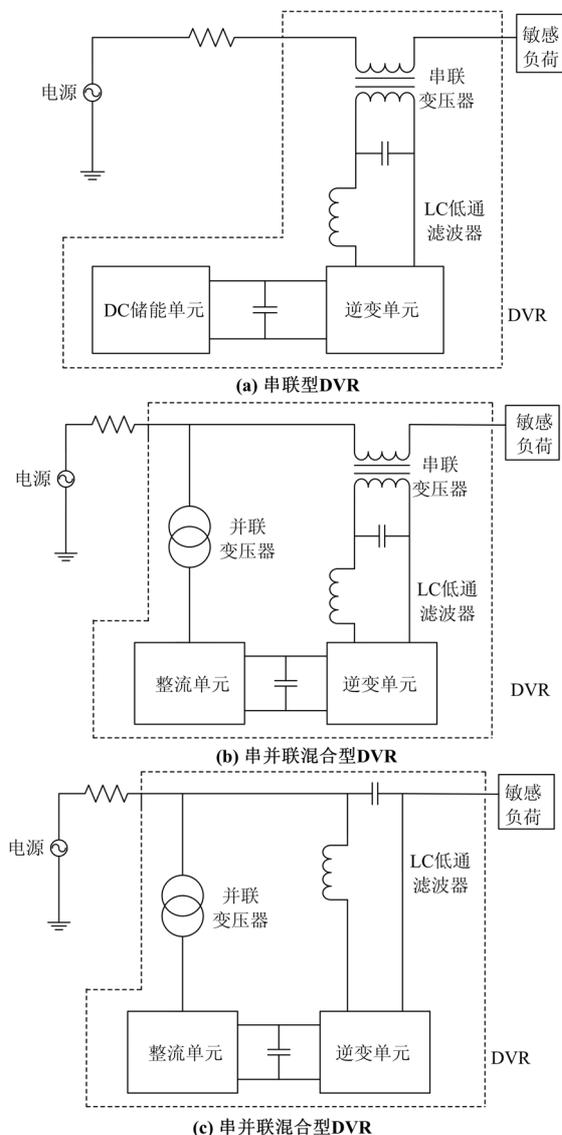


图2 DVR 结构图

Fig.2 The power circuit of DVR

2 DVR的逆变器控制策略

逆变器是DVR的核心组成部分之一。当系统电压发生凹陷时,逆变器能够根据所确定出的补偿量驱动功率模块,将产生的电压叠加到电网电压中,保持负载侧电压稳定。其控制策略的选取将直接影响装置的性能,因此诸多学者对其进行了探索研究。目前应用于DVR逆变器部分的控制策略如图3所示。

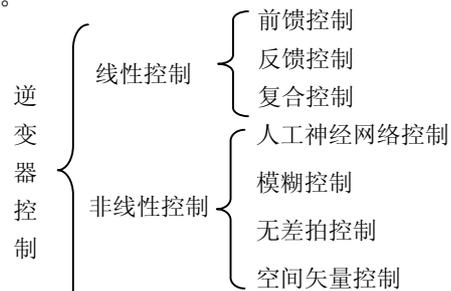


图3 DVR 逆变器控制策略

Fig.3 Inverter control strategy of DVR

2.1 线性控制

线性控制有着理论完善、稳定性好、稳态精度高和易于工程实现的优点。采用比例、积分、微分等典型的控制模块,加上几种校正网络,就可以实现预定的控制目标。线性控制方法主要有:前馈控制、反馈控制和复合控制。

2.1.1 前馈控制

前馈控制是比较简单的DVR控制方式,控制策略分析如图4所示。

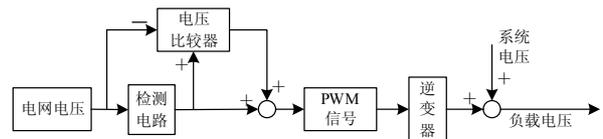


图4 前馈控制系统框图

Fig.4 Diagram of feed forward control

该方法能够快速检测并计算出需要补偿的电压信号,因此具有很高的动态响应速度。但是电网电压及其负载特性会在很大程度上影响DVR的输出电压,且前馈控制对负载的适应能力不强,电压超调比较严重,控制精度不高,很难得到好的补偿效果。文献[12]指出在串联电压控制器的控制系统采用前馈控制策略,其输出补偿电压的幅值和相位偏差不能消除。

基于上述问题,文献[13]将电网电压和负载电流看作两个干扰量,提出了误差校正控制方法。文献[14]在文献[13]的基础上利用电网电压前馈和负

载电流前馈的双前馈开环控制方法。大量的仿真结果看出, 双前馈控制方法比简单前馈控制效果好, 能有效地减小电网电压和负载电流对控制效果的影响。但是当负载电流存在高频谐波时, 校正效果会变差。

2.1.2 反馈控制

国外已经投入运行的 DVR 装置的反馈信号取自补偿前的系统电压, 能够对三相电压不对称进行治理。补偿电压与系统电压迭加时在变压器上发生相角和幅值的偏移, 同时谐波分量会在变压器上产生畸变, 为变压器和滤波器的设计带来困难^[15]。

为了提高补偿效果, 文献[15]提出了电压瞬时值反馈的控制方法, 以补偿电压凹陷为主兼顾治理电压谐波, 如图 5 所示。该系统在闭环控制下具有条件稳定性, 在系统稳定的情况下可以达到比较理想的补偿效果。对于电压谐波也有一定的治理效果。

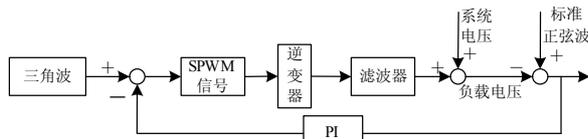


图 5 电压环反馈控制系统框图

Fig.5 Diagram of voltage-loop feedback control

在此基础上, 文献[16]提出了负载电压瞬时值反馈加电容电流局部反馈的方法。文献[17]对文献[16]提出的方法利用根轨迹法进行分析发现, 该方法在选取闭环极点时受到一定的限制。基于这一问题, 提出一种状态空间反馈控制方法, 可以任意设置闭环极点, 使得响应速度较之有所提高。

文献[18-21]也提出了电压外环、电流内环的双闭环反馈控制方案, 在电流内环反馈方面进行了不同的尝试。为了解决 DVR 中耦合变压器磁滞涌流问题, 文献[22]据此提出了闭环比例系数由瞬态向稳态衰减过渡的新型变参数双闭环控制策略。

综上所述, 反馈控制策略的具体方案有很多, 不同的策略控制效果也各有特点。总体而言, 采用反馈控制策略虽能在一定程度上消除变压器内阻和漏抗的影响, 修正补偿电压的偏差。但控制系数取值的限制影响补偿效果的提高。

2.1.3 复合控制

复合控制策略将电网侧电压前馈和负荷侧电压反馈相结合, 能兼具前馈和反馈控制策略的优点, 改善电压补偿效果。文献[23]提出了一种改进的控制方法, 在保留参考电压的前馈通道的同时, 增加一个对输出电压的反馈控制环节, 如图 6 所示。

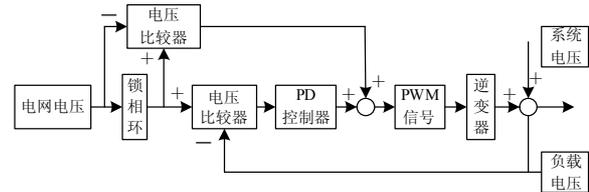


图 6 前馈 PD 控制框图

Fig.6 Diagram of PD control

文献[11]在此基础上对 DVR 系统的动态响应速度、稳态精度以及负载适应性进行仿真。电压凹陷跟踪补偿实验表明该方法具有良好的动态、稳态性能。抑制系统电压干扰实验表明该系统能够抑制干扰并保证系统输出的稳态精度。在负载适应性实验中, 将前馈 PD 复合控制与双环反馈控制补偿电压凹陷的效果作对比。当负载为阻感或者非线性负载时, 双环反馈控制的效果明显比前馈 PD 复合控制方法要差。主要表现在动态响应时间加长, 超调量变大, 稳态精度降低。文献[24]在文献[23]的基础上就轻载和重载的情况进行了仿真实验, 表明复合控制可以使 DVR 装置具有良好的暂态、稳态性能, 动态跟踪速度快, 负载适应性强。

若将复合控制中的反馈控制环节设计为双闭环, 与前馈控制相结合, 可以显著提高系统动态响应速度, 缩短补偿电压发出的时间。文献[25]在这一理论的基础上采用 PSCAD/EMTDC 软件进行了仿真实验并研制了一台三相 DVR 试验样机。文献[26]则提出了电感电流反馈加负荷电流前馈的控制方法, 去除了串联变压器, 减小 DVR 的规模和造价。

2.2 非线性控制

一般的 PI 控制适用于线性系统, 在局域范围内体现其控制的稳定性。由于 DVR 的逆变器本身就是非线性器件, 因此, 非线性控制方式具有更好的适应性。特别对于系统参数不稳定, 模型不明确的控制对象, 线性控制方法都有很大的局限性^[27]。神经网络、模糊控制、无差拍控制和空间矢量控制等非线性控制方法则可以很好地弥补这些缺陷。

2.2.1 神经网络控制

神经网络控制 (ANN) 是一种非线性控制方法, 具有自适应和自组织能力, 可以根据输入、输出学会他们之间的非线性关系, 无需系统的数学模型, 具有很强的抗干扰能力。按其结构可分为前馈神经网络、反馈神经网络、局部逼近神经网络和模糊神经网络。

文献[27]将该方法应用在 DVR 控制系统中, 考虑到 ANN 需要大量的样本进行离线训练, 样本的

选取和数量决定了 ANN 控制的效果。提出了基于空间矢量调制 (SVM) 的前馈神经网络控制, 利用 SVM 算法产生大量的数据, 实现离线训练, 结合自身的学习能力来提高系统的精度。在此基础上对 DVR 的人工神经网络控制和传统 PI 控制的效果进行对比研究, 发现 ANN 控制方法具有更广的工作区域, 更好的适应性和动态特性。

2.2.2 模糊控制

模糊控制是控制领域中一种新方法。目前, 模糊控制方式已经应用于脉宽调制 (PWM) 控制。针对 DVR 这种非线性、周期时变以及参数不稳定的结构特点, 同时为了提高 DVR 控制系统的稳定裕度、动态响应速度、负载调节特性以及稳定精度。文献[28]提出将模糊控制应用于 DVR 中, 无须对系统建立精确的数学模型, 通过对系统特征的模糊描述, 大大降低获取系统动态和静态特征量付出的代价, 具有较强的鲁棒性, 对外来干扰、过程参数变化和非线性因素均不敏感, 可以很好地满足系统的负载调节特性。

文献[29]对文献[28]提出的方法进行仿真研究后得出在稳态误差、负载适应性等问题上, 单纯的模糊控制不能满足系统的控制设计要求。基于此提出了参数模糊自整定的 PID 控制策略, 控制流程如图 7 所示。

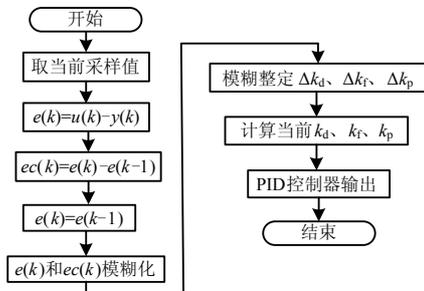


图 7 模糊 PID 控制流程图

Fig. 7 Diagram of fuzzy PID control

该方法不仅保持了常规 PID 控制系统原理简单、使用方便、鲁棒性较强的特点, 而且使系统既具有模糊控制的灵活性和适应性强的优点, 还可以有效抑制电压谐波和负载电流突变对系统输出的干扰。

2.2.3 无差拍控制

1985 年, Gokhale 在 PESC 年会上提出将无差拍控制应用于逆变器控制, 至今已发展为一种较为理想的输出电压瞬时值控制技术。图 8 为 DVR 逆变器无差拍控制算法流程^[30]。其中: u_{caf} 为输出电压; i_{La} 为负载电流; u_{ref} 为输出电压参考值。

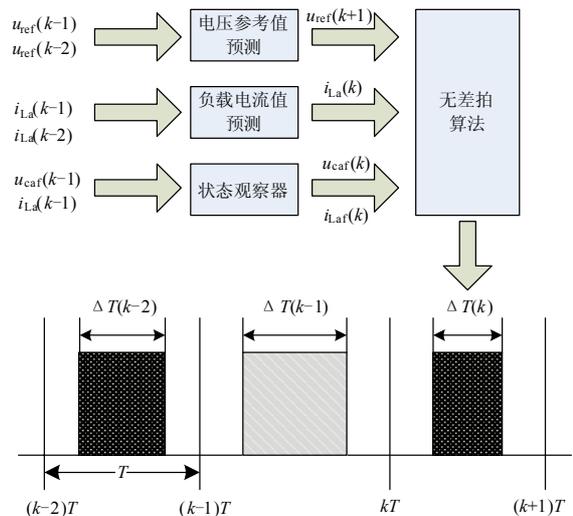


图 8 无差拍算法流程

Fig.8 Diagram of deadbeat control algorithm

根据含滤波器逆变系统的状态方程和输出反馈信号推算出下一个开关周期的脉冲宽度。保证在每一个采样时刻输出电压值与给定值精确相等, 由负载扰动或非线性负载引起的任何输出与给定的偏离, 都可以在一个开关周期内得到校正。具有可以消除稳态误差、尽快结束过渡过程以及控制精度高的优点, 但是控制效果依赖于系统状态空间表达式中参数的精确度, 存在鲁棒性差、瞬时响应超调量大等缺点。

2.2.4 空间矢量控制

空间矢量 PWM (SVPWM) 控制策略在于抛弃原有的正弦脉宽调制 (SPWM), 采用逆变器空间电压矢量的切换以获得准圆形旋转磁场, 从而在不太高的开关频率条件下, 使交流电动机获得较 SPWM 控制更好的性能。

文献[31]通过参考矢量所处的区域确定开关量和计算作用时间, 减小开关损耗, 实现解耦控制, 尤其适用于三相全桥逆变器的控制, 但实现起来比较复杂, 需要进行复杂的计算。文献[32]在空间电压矢量的合成中采用谐波含有率较低的七段式开关矢量控制策略进行零矢量的选择, 使 VSI 开关状态变化尽可能少, 既提高了直流侧电压利用率又减少了逆变器的开关损耗, 改善了电压的动态性能, 这种简单的矢量模式切换也更易于单片微处理器或 DSP 的实现。文献[33]提出了双闭环矢量控制。为了简化计算量, 文献[34]采用 PQR 瞬时功率理论直接将静止坐标系下的三相电压变换为 PQR 坐标系下的 3 个直流量, 然后分别进行矢量控制。

3 DVR 的整流器控制策略

针对串联型DVR不能连续补偿电网电压凹陷的问题,图2(b)、(c)所示的串并联型DVR(UDVR)采用整流电路将能量从电网转换到逆变器的直流侧,为逆变部分提供能量。因此需采用一定的方法控制输出电压保持恒定。目前应用于整流器的控制策略主要有:相角幅值控制、滞环控制、定频率预测控制、同步坐标系下状态变量电流控制、同步坐标系下带有前向反馈补偿的PI控制和最小时间电流控制。其中专家学者们应用于UDVR整流器部分的控制策略主要有:PID控制、滞环电流控制和基于恒频滞环电流控制的直接电流控制。

文献[35]考虑整个整流桥采用PID调节器来控制直流侧电压。由于采用不控或半控整流方式功率因数低,而且注入到系统中的谐波电流会干扰DVR的控制,影响补偿效果。文献[36]将基于IGBT的三相高频整流电路作为DVR能量的提取方式,控制策略主要是解决电流参考指令的产生和电流轨迹跟踪的问题。为了提高系统的动态响应,克服滞环电流控制的开关频率不定的缺点,文献[37]采用了基于恒频滞环电流控制(CFHC)的直接电流控制法对整流器进行控制。

4 结语

经过十几年的发展,国内外对动态电压恢复器控制策略的理论和实验研究已经取得了长足的进步。但电力电子技术的发展,非线性电力电子装置的广泛应用引起了更为严重的电能质量问题,同时用户对电能质量的要求也越来越高。在这样的新环境下,为了推进动态电压恢复器控制策略的研究和实用化研制,本文认为还需要在以下几个方面做更深入的探讨:

(1) 目前DVR的设计和研制具有很强的针对性,通常是专门为的系统设计和研制。为了提高其通用性,考虑有必要对各种电压扰动的成因、特点以及对典型负载的影响进行深入分析,研究和研制更具通用性的控制器,简化控制策略和控制器的设计,使其更易于实现。

(2) 对DVR进行结构改进、参数优化,以满足电压补偿快速性、准确性和经济性的要求,其中可连续运行的无串联变压器类型是一个发展方向。针对不同结构的DVR,选择与其相适应的控制策略也是非常重要的一点。

(3) 整流、逆变部分控制策略的选取直接决定了DVR的控制效果,目前DVR的控制仍然存在

着无法兼顾快速性、稳定性和通用性的缺点。这些问题不能依靠单一的控制策略来解决,考虑需要对现有的控制策略进行细化和完善,尝试多种控制策略相整合,扬长避短,以提高控制效果。同时,也可尝试将电力系统整流、逆变部分的其他新型控制策略应用于DVR中。

参考文献

- [1] Bollen M H J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sag and Interruptions[M]. IEEE Press, 2000.
- [2] Mcgranalhan M F, Roettger W C. The Economics of Custom Power[A]. in: Proceedings of the 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition[C].2003.7-12.
- [3] Woody N H, et al. Field Experience with Dynamic Voltage Restorer (DVRTM MV) Systems[A]. in: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting[C]. Piscataway, NJ, USA:2000.
- [4] 韩民晓, 尤勇, 刘昊. 线电压补偿型动态电压调节器DVR的原理与实现[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 49-53.
HAN Min-xiao, YOU Yong, LIU Hao. Principle and Realization of a Dynamic Voltage Regulator (DVR) Based on Line Voltage Compensating[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 49-53.
- [5] 王智勇, 吴正国, 侯新国. 基于动态预测的DVR检测算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 125-131.
WANG Zhi-yong, WU Zheng-guo, HOU Xin-guo. A Novel Detection Algorithm Based on Dynamic Forecast for Dynamic Voltage Restorer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 125-131.
- [6] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器的形态学-dq变换综合检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 28(6): 193-198.
FENH Xiao-ming, YANG Ren-gang. A Novel Integrated Morphology-dq Transformation Detection Algorithm for Dynamic Voltage Restorer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 28(6): 193-198.
- [7] 李彦栋, 王凯斐, 卓放, 等. 动态电压恢复器锁相技术和控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2): 24-26.
LI Yan-dong, WANG Kai-fei, ZHUO Fang, et al. Study of Phase Locked Technique and Control Strategies of Dynamic Voltage Restorer[J]. Power Electronics, 2004, 38(2): 24-26.
- [8] 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 Zhi-ping. A Survey on Detection Algorithm and Restoring Strategy of Dynamic Voltage Restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(6):

- 23-29.
- [9] 王同勋, 薛禹胜. S S CHOI. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (9): 101-107.
WANG Tong-xun, XUE Yu-sheng, CHOI S S. The Summary of Dynamic Voltage Restorer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (9): 101-107.
- [10] Chung Y H, Kim H J, Kwon G H, et al. Dynamic Voltage Restorer with Neural Network Controlled Voltage Disturbance Detector and Real-time Digital Voltage Control [J]. IEEE Trans on Power Engineering Society General Meeting, 2007, 24 (28) : 1-7.
- [11] 冯小明. 动态电压恢复器理论及仿真研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
FENG Xiao-ming. The Study and Simulation of Dynamic Voltage Restorer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [12] 何益宏, 王群, 卓放, 等. 串联电压控制器的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (18): 67-70.
HE Yi-hong, WANG Qun, ZHUO Fang, et al. Control Strategy on Series Voltage Controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (18): 67-70.
- [13] 史伟伟, 唐国庆, 李俊. 动态电压恢复器的控制策略[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37 (1): 64-69.
SHI Wei-wei, TANG Guo-qing, LI Jun. Control strategy of Dynamic Voltage Restorer[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37 (1): 64-69.
- [14] 史伟伟, 唐国庆, 李俊. 动态电压恢复器的双前馈控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (2): 11-15.
SHI Wei-wei, TANG Guo-qing, LI Jun. Double Feed-forward Control Strategy for Dynamic Voltage Restorer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (2): 11-15.
- [15] 黄瀚, 杨潮, 韩英铎, 等. 配电网动态电压调节器控制策略的研究[J]. 电网技术, 2002, 26 (1): 1-4.
HUANG Han, YANG Chao, HAN Ying-duo, et al. The Simulation and Experiment of Dynamic Voltage Restorer Control Strategy [J]. Power System Technology, 2002, 26 (1): 1-4.
- [16] 杨潮, 韩英铎, 马维新. 单相串联电压质量补偿器控制器的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 45-48.
YANG Chao, HAN Ying-duo, MA Wei-xin. Control Method of Single Phase Series Voltage Quality Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (15): 45-48.
- [17] 郭文勇, 赵彩宏, 张志丰, 等. 级联型超导储能系统的整体协调控制方法[J]. 电网技术, 2007, 31 (16): 55-59.
GUO Wen-yong, ZHAO Cai-hong, ZHANG Zhi-feng, et al. A System Control Strategy for Cascaded Superconducting Energy Storage System[J]. Power System Technology, 2007, 31 (16): 55-59.
- [18] Vilathgamuwa D W, Wijekoon H M. Control and Analysis of a New Dynamic Voltage Restorer Circuit Topology for Mitigating Long Duration Voltage Sags[A].in: Conference Record of 37th IAS Annual Meeting and World Conference on Industry Applications of Electrical Energy[C].Pittsburgh, PA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002.1105-1112.
- [19] 周雪松, 张智勇, 马幼捷, 等. 动态电压恢复器双闭环控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41 (6): 34-36.
ZHOU Xue-song, ZHANG Zhi-yong, MA You-jie, et al. Research on Dynamic Voltage Restorer with Double Closed-loop Control Strategy[J]. Power Electronics, 2007, 41 (6): 34-36.
- [20] Nielsen J, Newman M, Nielsen H, et al. Control and Testing of a Dynamic Voltage Restorer(DVR)at Medium Voltage Level[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (3): 806-813.
- [21] YAN Hui, LI Jun, TANG Guo-qing, et al. Study of Series Power Quality Compensator with Feedback Control Strategy for Inverters[C]. in: Proceeding of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies[C]. Hongkong.2004.752-757.
- [22] 刘硕, 姜齐荣. 基于激磁涌流抑制的动态电压调节器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (21): 58-62.
LIU Shuo, JIANG Qi-rong. Control Strategy of Dynamic Voltage Regulator Based on Inrush Current Mitigation Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (21): 58-62.
- [23] 谈萌, 王球保, 杨仁刚. 三单相结构的动态电压恢复器的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36 (6): 679-682.
TAN Meng, WANG Qiu-bao, YANG Ren-gang. Dynamic Voltage Restorer Based on Three Single-phases[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36 (6): 679-682.
- [24] 梁海涛. 动态电压恢复器的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
LIANG Hai-tao. The Study of Dynamic Voltage Restorer [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [25] 袁性忠, 姜新建, 黄宇淇. 动态电压恢复器的复合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (19): 61-68.
YUAN Xing-zhong, JIANG Xin-jian, HUANG Yu-qi. Complex Control Strategy of Dynamic Voltage Restorer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (19): 61-68.
- [26] Sngkek, Choiss, Vilathgamuwadm. Analysis of Series

- Compensation and DC-link Voltage Controls of a Transformerless Self-charging Dynamic Voltage Restorer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (3): 1511-1518.
- [27] Jurado F. Neural Network Control for Dynamic Voltage Restorer[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51 (3): 727-729.
- [28] Jurado F, Valverde M. Operation of the Dynamic Voltage Restorer with Fuzzy Logic Control[A].in:Proceedings of the 4th International Power Electronics and Motion Control Conference[C].Xi'an(China): 2004: 891-895.
- [29] 雷燕. 基于智能控制的动态电压恢复器的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2007.
LEI Yan. A Study of Dynamic Voltage Restorer Based on Intelligence Control[D]. Xi'an: Xi'an University of Science & Technology, 2007.
- [30] 马振国, 李鹏, 赵保利, 等. DVR 电压波形跟踪无差拍控制方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (3): 13-17.
MA Zhen-guo, LI Peng, ZHAO Bao-li, et al. Voltage Waveform Deadbeat Control of DVR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (3): 13-17.
- [31] 曾江, 刁勤华, 倪以信, 等. 基于最优电压矢量的有源滤波器电流控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (6): 25-31.
ZENG Jiang, DIAO Qin-hua, NI Yi-xin, et al. A Novel Current Control Method for Active Power Filter Based on Optimal Voltage Vector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (6): 25-31.
- [32] 李丽. 基于电压空间矢量脉宽调制的动态电压调节器研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
LI Li. A Study of Dynamic Voltage Restorer Based on Space-voltage Vector Pulse Width Modulation[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [33] Awadh, Blaabjerg F. Transient Performance Improvement of Static Series Compensator by Double Vector Control[A].in: Proceedings of 19th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004.607-613.
- [34] Lee S J, Kim H, Sul S K, et al. A Novel Control Algorithm for Static Series Compensators by Use of PQR Instantaneous Power Theory[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (3): 814-827.
- [35] 吴卫兵, 高天星. 可连续运行的 DVR 装置研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28 (6): 120-122.
WU Wei-bing, GAO Tian-xing. Study on DVR Device with Uninterrupted Operation[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28 (6): 120-122.
- [36] 尹忠东, 支丽欣. 基于高频整流的动态电压恢复器能量提取方式[J]. 电力电子技术, 2005, 39 (6): 67-69.
YIN Zhong-dong, ZHI Li-xin. High Frequency Reversible Rectifier Based Energy Extraction of Dynamic Voltage Restorer[J]. Power Electronics, 2005, 39 (6): 67-69.
- [37] 赵剑峰, 蒋平, 唐国庆. 基于电压型逆变器的可连续运行的动态电压恢复器(UDVR)的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17 (3): 88-92.
ZHAO Jian-feng, JIANG Ping, TANG Guo-qing. Research on VSI-based Uninterrupted Dynamic Voltage Restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17 (3): 88-92.

收稿日期: 2009-01-22; 修回日期: 2009-06-02

作者简介:

王晶(1974-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统建模与仿真, 电能质量的监测、识别与控制方法的研究; E-mail: kmhelen@zjut.edu.cn

徐爱亲(1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统建模与仿真、电能质量的控制方法的研究。

(上接第 144 页 continued from page 144)

- JIANG Dao-zhuo, et al. Research and Development of Short-circuit Current Limiting Technology[J]. Transaction of Power System and Automation, 2007, 19 (3): 8-19.
- [8] 周挺, 张铭. 华东电网 500 kV 短路电流限制器示范工程选点方案[J]. 华东电力, 2008, 36 (9): 43-46.
ZHOU Ting, ZHANG Ming. Siting Schemes for Demonstration Engineering Projects of 500kV Short Circuit Current Limiters in East Chin Power Grid[J]. East China Electric Power, 2008, 36 (9): 43-46.
- [9] 毛雪雁, 宣晓华. 500 kV 自耦变压器中性点小电抗接地的研究[J]. 华东电力, 2005, 33 (5): 26-29.
MAO Xue-yan, XUAN Xiao-hu. 500 kV Autotransformer with Neutral Point Grounded Through Small Reactance Research[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (5): 26-29.

收稿日期: 2009-02-06; 修回日期: 2009-04-21

作者简介:

韩戈(1970-), 男, 江苏徐州人, 工程师, 主要从事电力系统设备管理工作;

韩柳(1975-), 女, 江苏徐州人, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计研究工作; E-mail: hlhanliu@163.com

吴琳(1969-), 女, 江苏徐州人, 讲师, 主要从事电力系统培训教育工作。