

# 基于电容谐波电流抑制的动态电压恢复器控制方法

周卫平, 吴正国, 夏立, 李哲

(海军工程大学 电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 针对传统双环反馈控制方法在补偿非线性负载电压跌落时存在补偿精度不高和含有谐波的不足之处, 在详细分析了非线性负载对动态电压恢复器补偿特性影响的基础上, 提出了一种基于电容谐波电流抑制的新型控制方法。在检测出谐波电流后, 通过控制动态电压恢复器产生反向谐波电流来抑制电容电流中的谐波成分, 进而消除非线性负载对动态电压恢复器的不利影响。仿真和实验结果验证了所提方法能有效解决非线性负载的电压跌落问题。

**关键词:** 动态电压恢复器; 双环控制方法; 电容电流; 谐波电流; 谐波抑制

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.011

## 0 引言

动态电压恢复器 DVR(Dynamic Voltage Restorer) 作为治理电压暂降问题的有效手段得到了广泛的研究和应用<sup>[1-6]</sup>。现有文献对其的研究主要集中在对线性负载的补偿上<sup>[7-11]</sup>, 而对非线性负载工况下的电压补偿研究得较少。实际电力系统中负载大多以非线性形式存在, 非线性负载产生的谐波电流在一定程度上恶化了 DVR 的补偿效果。

传统采用电容电流反馈的方法<sup>[12-13]</sup>可提高 DVR 的动态响应速度和稳定性, 但对谐波电流影响的消除是有限的。文献<sup>[14]</sup>采用重复控制来补偿谐波电流对 DVR 的不利影响, 这种控制是建立在负载谐波电流以周期形式重复出现的基础上, 实际上负载侧的电压是由电源侧电压和 DVR 补偿电压共同建立的, 其谐波电流也受到 DVR 补偿电压的影响而变化, 因此这种重复控制在电压跌落严重时将很难消除谐波电流对 DVR 的不利影响甚至会导致系统的不稳定。

本文在分析了传统电压外环、电流内环控制特性的基础上, 针对非线性负载在 DVR 串接电容上产生的谐波电流问题, 提出了一种谐波电流的抑制方法, 从而消除了非线性负载对 DVR 的不利影响, 实现了 DVR 对任意负载的电压补偿。

## 1 DVR 的基本数学模型

三相 DVR 的基本电路结构如图 1 所示, 主电路由全控型 PWM 逆变器构成, 各相通过隔离变压器串联接入电网, 为了减小系统损耗, 工程应用中常在隔离变压器的二次侧加装旁路开关, 网侧电压处于正常范围内时, 旁路开关闭合, 此时 DVR 不运行, 仅当网侧电压异常时才打开旁路开关将 DVR 投入运行。

为便于分析, 可建立单相 DVR 在静止  $abc$  坐标

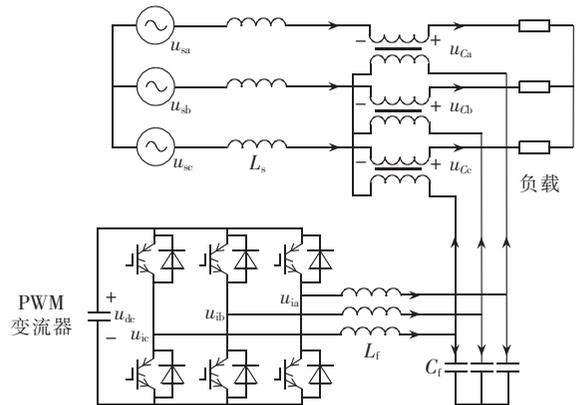


图1 DVR的基本电路结构

Fig.1 Basic circuit structure of DVR

系下的基本模型, 按照图 2 中定义的电压、电流方向, 将漏阻、漏感变压器参数折算到变压器二次侧, 忽略线路阻抗和网侧电感, 可根据基尔霍夫定理, 建立单相 DVR 的数学模型如下:

$$\begin{cases} u_s(t) + u_C(t) = u_1(t) \\ u_1(t) = L_f \frac{di_L(t)}{dt} + u_C(t) \\ i_C(t) = C_f \frac{du_C(t)}{dt} \\ i_L(t) = i_C(t) + i_s(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $u_s(t)$ 、 $u_C(t)$ 、 $u_1(t)$ 、 $u_i(t)$  分别为网侧电压、输出滤波器中电容上电压、负载侧电压和 PWM 逆变器的等效输出电压;  $i_s(t)$ 、 $i_L(t)$ 、 $i_C(t)$  分别为网侧电流(本文中等于负载侧电流)、输出滤波器中电感电流和电

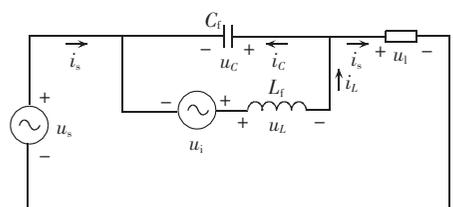


图2 单相 DVR 的数学模型

Fig.2 Mathematical model of single-phase DVR

容电流。

## 2 DVR 的电压电流双环控制方法

DVR 的电压电流双环控制方法由电压外环、电流内环构成,其中电压外环可由电压瞬时控制和前馈构成。通过前馈控制获得良好的动态响应特性,而电压瞬时控制及时矫正输出电压与参考值电压的幅值和相位的误差;电流内环通常采用电容电流负反馈的形式。其完整的控制结构如图 3 所示,其中  $u_{ref}$ 、 $u_i$  与  $u_c$  分别表示参考补偿电压、逆变器电压指令值和经过 LC 滤波器的输出电压; $K_{PWM}$  为逆变器等效增益,本文使用空间矢量调制(SVPWM)方法<sup>[15]</sup>,因此  $K_{PWM}$  取为 1。

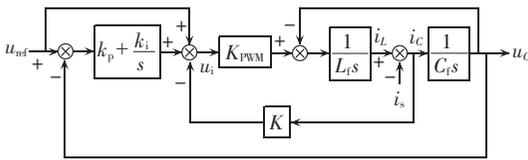


图 3 DVR 的双环控制模型

Fig.3 Dual-loop control model of DVR

根据图 3 可得系统的传递函数如下:

$$u_c = \frac{K_{PWM}(k_p + 1)s + K_{PWM}k_i}{D(s)} u_{ref} - \frac{L_f s^2}{D(s)} i_s \quad (2)$$

$$D(s) = L_f C_f s^3 + K K_{PWM} C_f s^2 + (K_{PWM} k_p + 1)s + K_{PWM} k_i = 0 \quad (3)$$

其中,  $D(s)$  为闭环系统的特征方程。

根据系统的传递函数,选取适当的参数可绘得输出电压对参考电压的闭环 Bode 图,如图 4 所示。从图中可看出,PI 控制 + 前馈方式下,系统在 LC 谐振频率处的增益非常大,整个系统趋于不稳定;引入电流内环后,系统在 LC 谐振频率处的增益得到了很好的衰减,稳定性较原有的 PI 控制有了很大的改善。

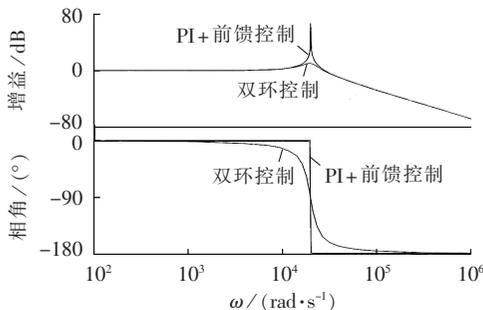


图 4 输出电压对参考电压的闭环 Bode 图 (电压电流双环方法)

Fig.4 Bode plot of output voltage relative to reference voltage(dual-loop control scheme)

图 5 是输出电压对负载电流的闭环 Bode 图,可知,引入电容电流反馈后,输出电压对负载电流的闭环增益仅在 LC 谐振频率处得到了一定的衰减,但对于角频率大于 2 000 rad/s(约 7 次谐波)以上的谐波

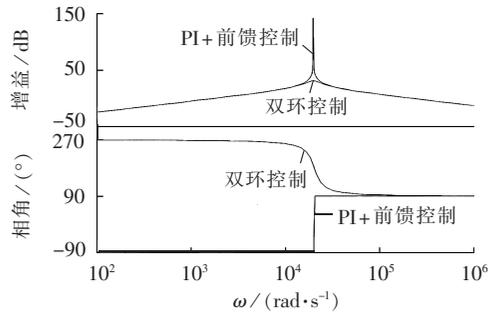


图 5 输出电压对负载电流的闭环 Bode 图 (电压电流双环方法)

Fig.5 Bode plot of output voltage relative to load current(dual-loop control scheme)

电流,电压电流双环控制方式不能有效地抑制,因此,当补偿非线性负载时,负载电流中的谐波成分将影响电压补偿,常表现为补偿后的负载侧电压含有不可忽略的谐波成分,其畸变率较高。

## 3 基于谐波电流抑制的新型电压补偿方法

当补偿非线性负载时,负载电流中的谐波成分在 DVR 输出滤波器的电容支路上叠加了一部分不希望产生的谐波电压,因此要保证 DVR 输出电压准确跟踪参考电压,则需要滤除这部分谐波电压。实际上电容上的电压可分为:基波电压部分、主要次谐波电压部分(<25 次)<sup>[16]</sup>和开关次谐波电压。由 LC 输出滤波器的滤波特性可知,开关次谐波电压主要存在于电感上,电容上的开关次谐波电压含量非常小,其对负载电压的畸变影响可以忽略不计,因此,需要考虑的是基波次误差电压和由非线性负载产生的主要次谐波电压。与此相对应的是基波误差电流和主要次谐波电流,因此可考虑对这部分电流分量进行补偿进而消除电压误差。

为便于分析,可作合理假设:DVR 的开关频率远大于电网基波频率,则负载侧电流在一个采样周期内可看作是不变的。在采样精度足够高的情况下,第  $k$  个采样时刻待补偿电流分量  $i_{c\_h}(kT_s)$  可通过以下的方法估计得到:

$$\begin{cases} u_{c\_Δ}(kT_s) = u_c(kT_s) - u_{ref}(kT_s) \\ i_{c\_Δ}(kT_s) = C_f \frac{du_{c\_Δ}(kT_s)}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $u_{c\_Δ}(kT_s)$  表示电容上的误差电压,  $u_{ref}(kT_s)$  表示输出参考电压,  $i_{c\_Δ}(kT_s)$  表示电容上的误差电流,将  $i_{c\_Δ}(kT_s)$  通过一个截止频率大于主要次谐波频率的低通滤波器即可得待补偿电流分量  $i_{c\_h}(kT_s)$ ,即:

$$i_{c\_h}(s) = G_p(s) i_{c\_Δ}(s) = \frac{1}{s/\omega_c + 1} i_{c\_Δ}(s) \quad (5)$$

其中,  $G_p(s)$  为低通滤波器,  $\omega_c$  为滤波器的截止频率。

欲消除电容上的待补偿电流分量  $i_{c\_h}(kT_s)$ ,需要 DVR 在第  $(k+1)T_s$  时刻通过电感支路产生一个反向

的谐波电流注入到电容支路,考虑负载侧电流在一个采样周期内保持不变,可得下一个时刻 DVR 的输出指令:

$$\begin{cases} u_i(kT_s+T_s) = u_{C\_ref}(kT_s+T_s) + L_f \frac{di_L(kT_s+T_s)}{dt} \\ i_L(kT_s+T_s) = i_s(kT_s) - i_{C\_h}(kT_s) \end{cases} \quad (6)$$

电容谐波电流和基波误差电流以反馈的形式引入到 DVR 的控制中,可实时跟踪电容输出电压的变化,及时抑制电容上的主要次谐波电流,进而消除谐波电压对输出电压的不利影响。引入电容谐波电流反馈和负载电流前馈后系统完整的控制框图见图 6。

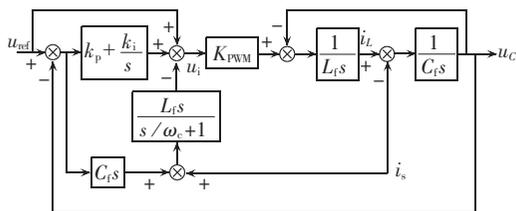


图 6 完整的系统控制框图

Fig.6 Complete block diagram of system control

根据图 6 可得系统的传递函数如下:

$$u_c = \frac{K_{PWM} [\omega_c L_f C_f s^3 + (k_p + 1)s^2 + (k_i + k_p \omega_c + \omega_c)s + k_i \omega_c]}{D'(s)} \times u_{ref} - \frac{L_f s^3 + \omega_c L_f (K_{PWM} - 1)s^2}{D'(s)} i_s \quad (7)$$

$$D'(s) = L_f C_f s^4 + \omega_c L_f C_f (1 + K_{PWM})s^3 + (K_{PWM} k_p + 1)s^2 + \omega_c (1 + K_{PWM} k_p + K_{PWM} k_i) + \omega_c K_{PWM} k_i = 0 \quad (8)$$

其中,  $D'(s)$  为闭环系统的特征方程。

对式(8)的特征方程,可采用 Routh 判据来分析系统稳定的充要条件,为便于分析,将  $K_{PWM}$  取为 1,得到 PI 参数的选择区间:

$$\begin{cases} 1 + k_p - k_i > 0 \\ -2\omega_c L_f C_f - \sqrt{(2\omega_c L_f C_f)^2 + (1 + k_p)^2} < k_i < \\ -2\omega_c L_f C_f + \sqrt{(2\omega_c L_f C_f)^2 + (1 + k_p)^2} \end{cases} \quad (9)$$

确定 PI 参数后可得到输出电压对参考电压和负载电流的闭环 Bode 图如图 7、图 8 所示。可看出,引入谐波电流抑制后,系统的稳定性得到了较好的改善,与电容电流负反馈内环相比,可抑制的谐波电

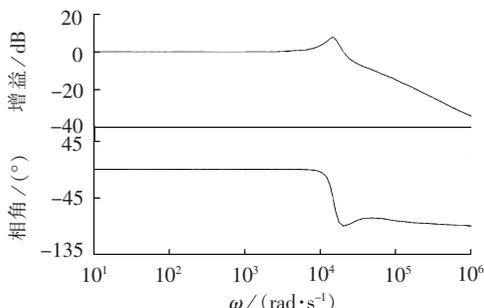


图 7 输出电压对参考电压的闭环 Bode 图(所提方法)

Fig.7 Bode plot of output voltage relative to reference voltage(proposed control scheme)

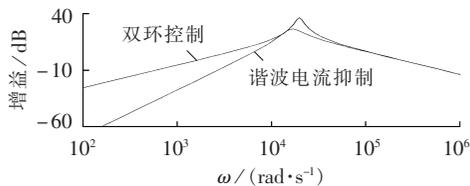


图 8 输出电压对负载电流的闭环 Bode 图(所提方法)

Fig.8 Bode plot of output voltage relative to load current(proposed control scheme)

流次数有了较大的增加,能对角频率小于 5 000 rad/s (约 15 次谐波)的谐波电流有效抑制,且其衰减的幅度比原有方法更大。

### 4 仿真与实验验证

在 MATLAB 中搭建三相三线 DVR 的仿真模型以验证本文控制方法的有效性,仿真参数如下:电源侧相电压额定值 220 V,隔离变压器的变比为 1:1,采样频率和开关管导通频率均为 10 kHz,LC 输出滤波器的参数为  $L_f=1.5$  mH 和  $C_f=5$   $\mu$ F。

图 9 是采用本文方法时 DVR 对线性负载的补偿仿真结果,可看出,DVR 能够及时产生准确的补偿电压,负载侧电压仅在电压跌落瞬间存在一定的波动,补偿后的电压能准确跟踪参考电压。

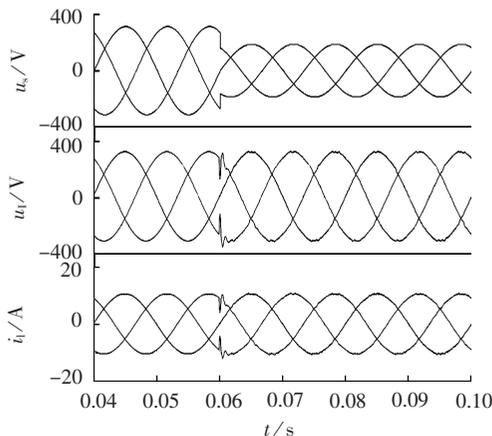


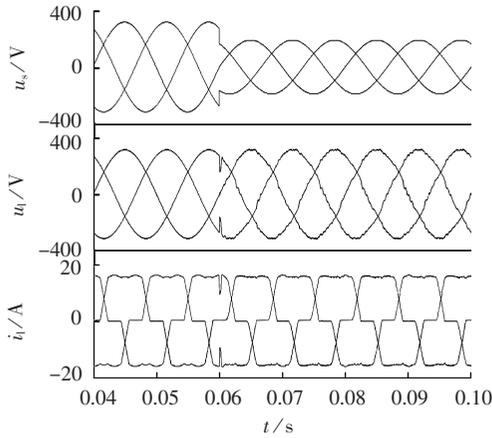
图 9 对线性负载电压跌落补偿的仿真结果

Fig.9 Simulative results of voltage sag compensation for linear load

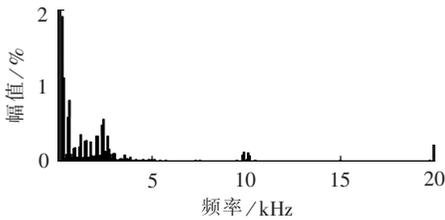
图 10(a)是采用电压电流双闭环控制方法对非线性负载电压跌落的补偿仿真结果,可看出,采用电容电流反馈的内环后,DVR 基本能够产生参考电压分量,但补偿后的负载电压含有一定的谐波成分,尤其是在负载谐波电流变换较快时,负载电压畸变较严重,这是因为电容电流的负反馈并未将谐波电流成分分离出来,并且经过 LC 输出滤波器后,这部分电容电流的反馈量无法准确抵消电容上的谐波电流成分;图 10(b)是负载电压的谐波分布图,可看出低频率的谐波电压未得到有效抑制,谐波总畸变率约为

2.81%。图 11(a)是采用文中提出的谐波电流抑制方法后,非线性负载侧电压的仿真结果,可知,电容电流的谐波成分得到了有效的抑制,表现为补偿后负载侧电压的波形畸变率较低;图 11(b)是负载电压的谐波频谱分布图,对比双闭环控制方法下的电压谐波频谱图可看出,低频次的谐波电压得到了更好的抑制,谐波总畸变率约为 1.44%。

为进一步验证本文所提方法的有效性,搭建了一台三相三线 DVR 的实验样机,主要参数为:三相相电压额定值 110 V,采样频率和开关频率均为 10 kHz, DVR 输出滤波器的参数实测为电感值 1.79 mH 和电容值 5.1  $\mu$ F,串联隔离变压器的变比为 1:1。为便于



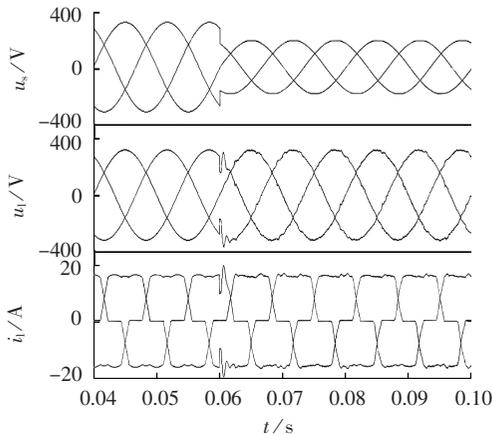
(a) 电压补偿仿真结果



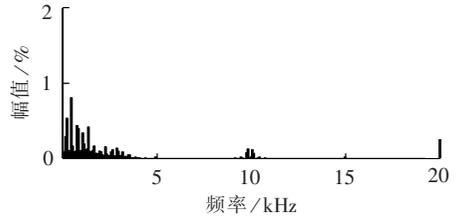
(b) 负载端电压谐波分布频谱图

图 10 非线性负载电压补偿仿真结果 (电压电流双环方法)

Fig.10 Simulative results of voltage compensation for nonlinear load (dual-loop control scheme)



(a) 电压补偿仿真结果



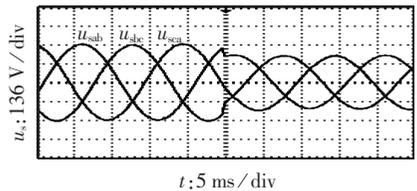
(b) 负载端电压谐波分布频谱图

图 11 非线性负载电压补偿仿真结果(所提方法)

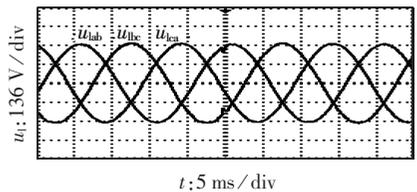
Fig.11 Simulative results of voltage compensation for nonlinear load(proposed control scheme)

实验,DVR 未使用投切开关而是直接串接入电网,因此 DVR 始终处于工作状态。

图 12(a)是网侧电压跌落 30% 的实验波形,图 12(b)是 DVR 补偿后负载侧电压的实验波形,其补偿结果与仿真结果是一致的,DVR 能迅速对网侧电压跌落作出响应并产生相应的补偿电压。



(a) 网侧电压跌落 30%

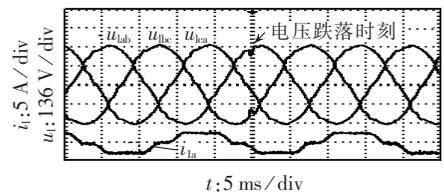


(b) DVR 补偿后负载侧电压

图 12 线性负载电压跌落补偿实验结果

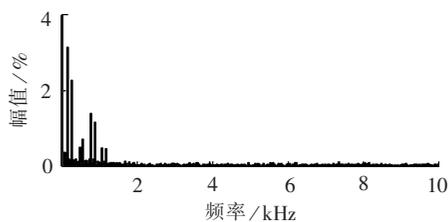
Fig.12 Experimental results of voltage sag compensation for linear load

图 13(a)是网侧电压跌落 30% 且负载侧含有非线性负载,采用电压电流双环控制方法时 DVR 的补偿结果;图 13(b)是负载端电压的谐波频谱分布图,谐波总畸变率为 4.44%。图 14(a)是采用本文提出的带有谐波电流抑制的控制方法时负载侧电压补偿结果,图 14(b)是其谐波频谱图,谐波总畸变率为 2.71%。比较图 13 和图 14 的实验结果可知,与原有方法相比,采用谐波电流抑制方法后,负载侧电压中的谐波成分得到了有效的抑制,电压畸变率得到了很好的降低,这与前述的理论分析可仿真结果是基本一致的。



(a) 实验波形

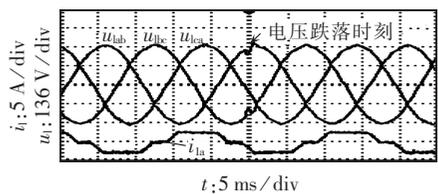
(b) 负载端电压谐波分布频谱图



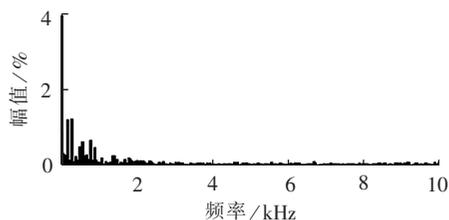
(b) 谐波分布图

图13 非线性负载电压跌落补偿实验结果(双环控制方法)

Fig.13 Experimental results of voltage sag compensation for nonlinear load (dual-loop control scheme)



(a) 实验波形



(b) 谐波分布图

图14 非线性负载电压跌落补偿实验结果(所提方法)

Fig.14 Experimental results of voltage sag compensation for nonlinear load (proposed control scheme)

## 5 结论

本文提出了一种基于谐波电流抑制的新型 DVR 控制方法,通过对 DVR 串接电容中谐波电流的抑制,有效降低了补偿电压中的谐波成分,保证了电源电压发生跌落时 DVR 对非线性负载的电压补偿效果。仿真和实验也进一步验证了所提方法的有效性。所提方法简便易行,有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 黄本润,夏立,吴正国,等. 线电压补偿型动态电压恢复器的双前馈加反馈控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):61-65.  
HUANG Benrun,XIA Li,WU Zhengguo,et al. Double feedforward plus feedback control strategy based on line voltage compensation for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(10):61-65.
- [2] 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):45-49.  
YANG Chao,HAN Yingduo,MA Weixin. Control method of single phase series voltage quality compensator[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(15):45-49.
- [3] 郭春林,刘裕昆,肖湘宁,等. 三单相 DVR 的分析方法和补偿策

略[J]. 电力自动化设备,2011,31(12):49-54.

- GUO Chunlin,LIU Yukun,XIAO Xiangning,et al. Analysis method and control strategy of triple single-phase DVR [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(12):49-54.
- [4] 张强,周晖,齐智平. 适用于动态电压恢复器电压检测的滤波算法[J]. 电工技术学报,2009,24(8):135-140.  
ZHANG Qiang,ZHOU Hui,QI Zhiping. Filtering method for dynamic voltage regulator [J]. Transactions on China Electrotechnical Society,2009,24(8):135-140.
- [5] 王智勇,吴正国,周卫平,等. 基于基波特征量提取的 DVR 参考电压波形生成算法[J]. 电工技术学报,2009,24(4):168-174.  
WANG Zhiyong,WU Zhengguo,ZHOU Weiping,et al. A novel reference wave generating algorithm based on characteristic vector extracted for DVR [J]. Transactions on China Electrotechnical Society,2009,24(4):168-174.
- [6] 王松琴,于坤山,汤广福. 动态电压恢复器数字矢量控制方法的性能分析及改进[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):64-71.  
WANG Songqin,YU Kunshan,TANG Guangfu. Performance analysis and improvement of digital vector control algorithm for dynamic voltage restorer [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(7):64-71.
- [7] 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 Xuesong,ZHANG Zhiyong,MA Youjie,et al. Research on dynamic voltage restorer with double closed-loop control strategy [J]. Power Electronics,2007,41(6):34-36.
- [8] 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 Weiwei,TANG Guoqing,LI Jun. Double feed-forward control strategy for dynamic voltage restorer [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(2):11-15.
- [9] 申科,王建斌,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.
- [10] LI Yunwei,FREDE B,VILATHGAMUWA D M,et al. Design and comparison of high performance stationary-frame controllers for DVR implementation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):602-612.
- [11] ALI Y G,SEYED H H,MEHRAN S,et al. Three-phase HFL-DVR with independently controlled phases [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(4):1706-1718.
- [12] MAHINDA V,RANJITH P,CHOI S S. Performance improvement of dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2002,17(5):824-834.
- [13] 姜齐荣,赵东元,陈建业. 有源电力滤波器——结构、原理、控制 [M]. 北京:科学出版社,2005:123-132.
- [14] CHO Younghoon,SUL Seungki. Controller design for dynamic voltage restorer with harmonics compensation function [C]// 2004 IEEE IAS Annual meeting on Industry Applications conference. Seattle,USA:IEEE,2004:1452-1457.
- [15] 周卫平,吴正国,夏立,等. SVPWM 的等效算法及 SVPWM 与 SPWM 的本质联系[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2):133-137.  
ZHOU Weiping,WU Zhengguo,XIA Li,et al. A novel algorithm of SVPWM and the study on the essential relationship between SVPWM and SPWM [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2):133-137.
- [16] 周娟,张勇,耿乙文,等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的

改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(6):113-120.  
 ZHOU Juan,ZHANG Yong,GENG Yiwen,et al. An improved proportional resonant control strategy in static coordinate for four-leg active power filters[J]. Proceedings of the CSEE,2012, 32(6):113-120.

#### 作者简介:

周卫平(1969-),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究

方向为电能质量分析与控制;

吴正国(1943-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为数字信号处理、电能质量分析与控制;

夏立(1964-),男,湖北武穴人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为舰船能量管理系统;

李哲(1986-),男,安徽肥东人,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:liuguangniao@yahoo.com.cn)。

## Dynamic voltage restorer control based on capacitor harmonic current suppression

ZHOU Weiping, WU Zhengguo, XIA Li, LI Zhe

(College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The compensation accuracy of traditional dual-loop feedback control is low when the voltage sag of nonlinear load is compensated and it contains harmonics. The influence of nonlinear load on the compensating characteristics of DVR(Dynamic Voltage Restorer) is explored and a control scheme based on capacitor harmonic current suppression is proposed, which controls DVR to generate an opposite harmonic current to suppress the harmonic components of capacitor current after the harmonic current is detected. The adverse influence of nonlinear load on DVR is thus eliminated. Simulative and experimental results show the viability and effectiveness of the proposed control scheme.

**Key words:** dynamic voltage restorer; dual-loop control; capacitor current; harmonic current; harmonic suppression

(上接第 63 页 continued from page 63)

## Energy management with stochastic constraint and multi-objective optimization algorithm for electric vehicle battery swap station

LIU Yujiao, JIANG Chuanwen, WANG Xu, SHEN Jingshuang

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The optimization of energy management for electric vehicle battery swap station is researched. Because the energy management of electric vehicle battery swap station has a certain risk, its model, built with the consideration of the uncertainties in electricity price and power demand, takes the expectation and variance of cost as its objectives and solved by a multi-objective optimization algorithm based on immune clone method. Simulative results show that, the electricity purchase cost of battery swap station is lowered by the optimized energy management and the power network obtains benefit by the load transfer.

**Key words:** electric vehicles; battery swap station; energy management; immune clone algorithm; stochastic constraint