

一种新型动态电压恢复器的仿真与实验

王宝安¹, 孟庆刚¹, 商 姣¹, 黄学良¹, 刘 伟²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 提出一种新型可连续运行动态电压恢复器, 主电路采用级联多电平结构, 电网电压经过各隔离变压器后分别进行整流, 给逆变单元的直流电容供电, 通过电容耦合方式串入电网与负载之间; 采用同相补偿法对电网电压进行幅值补偿, 并引入改进的 dq 变换直接在线计算出补偿电压。利用 PSIM 软件进行仿真分析, 并研制了实验样机。仿真及实验结果表明, 该动态电压恢复器能够快速、有效补偿电网电压跌落以及电网电压谐波, 保证了负载侧的用电质量。

关键词: 可连续运行动态电压恢复器; 级联多电平; 同相补偿法; 改进的 dq 变换; 补偿; 电压控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.005

0 引言

随着现代工业的不断发展, 以电弧炉、电力机车为代表的各种冲击性负载大量涌现。一方面, 这些负载会带来电压跌落、电压谐波、三相不平衡等电压质量问题; 另一方面, 一些敏感负载(如电信、医疗、军事、金融等行业的微处理器、计算机)对电网电压的波动十分敏感, 若处理不当, 将会造成重大的经济损失和不良的社会影响^[1]。动态电压恢复器 DVR^[2] (Dynamic Voltage Restorer) 是一种串联型电能质量补偿装置, 能够有效减小电网电压跌落、电压谐波、三相不平衡等电压质量问题对负载造成的影响。

从 1996 年第一台 DVR 投运以来, DVR 在储能单元、逆变单元、耦合单元等主电路拓扑结构上有了很大的发展^[3]。文献[4]提出一种可连续运行的 DVR, 其直流电压通过与电网相连的 PWM 整流器

提供, 可以连续对电网电压进行补偿, 该装置采用耦合变压器和电网连接, 逆变单元产生的高次谐波会增加变压器的设计难度, 变压器的瞬间涌流问题也会给系统带来安全威胁^[5]。随着 DVR 在中高压配电网中的应用需求升级, 中高压大容量拓扑——级联 H 桥逆变单元因结构简单、易于模块化、输出电压谐波小等优点而受到青睐, 文献[6]提出一种应用于高压场合的 DVR, 逆变单元由 H 桥级联而成, 各 H 桥直流侧采用分立储能元件供电, DVR 的补偿能力会受分立储能元件的容量限制; 文献[7]研究的 DVR 拓扑, 逆变单元同样采用级联 H 桥, 三相电网电压经多绕组变压器后进行整流, 给各 H 桥直流侧供电, 这种拓扑结构不需要多余的储能元件, 但随着级联单元数的增多, 多绕组变压器的设计将变得困难。这 2 种 DVR 拓扑的逆变单元均通过电容耦合方式接入电网, 有利于节省成本以及提高系统可靠性。

本文结合现有 DVR 拓扑结构的优点, 提出一种

收稿日期: 2012-10-30; 修回日期: 2013-06-26

Hybrid algorithm to calculate minimum load margin

ZHANG Feng¹, DONG Xiaoming¹, LIANG Jun¹, HAN Xueshan¹, SUN Hua², LIU Ning³

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Department of Electrical and Automation, Shandong Labor Vocational and Technical College, Ji'nan 250022, China;

3. Dezhou Power Supply Company of Shandong, Dezhou 253008, China)

Abstract: A hybrid algorithm is proposed to calculate the minimum load margin under the constraint of static voltage stability. A fast and efficient method is proposed to identify the limit induced bifurcation for the continuation power flow method, which considers the impact of reactive compensation device switching on load margin, applies the power factor of load increment to constrain the direction of load growth, and takes the generator reactive constraint into account to improve the adaptive step control strategy. A variable weight coefficient and variable learning factor strategy is adopted for the particle swarm optimization method, which applies a precocity criterion to carry out the particle variance with a certain probability and combines with the simulated annealing process to prevent local optimization. Case test verifies the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: electric power systems; load margin; continuation power flow; simulated annealing; particle swarm optimization; models

新型可连续运行的级联多电平 DVR, 其三相结构相同且相互独立, 逆变单元采用级联 H 桥结构, 电网相电压经过隔离变压器后进行整流, 给各 H 桥直流电容供电, 使装置可以连续运行, 逆变单元通过电容与电网耦合, 省去了耦合变压器。该拓扑从整流到逆变, 结构相同, 易于模块化, 可拓展应用于中高压配电系统中。本文介绍了该 DVR 的主电路结构、补偿策略和补偿电压计算方法, 并完成了软件仿真和样机实验。

1 DVR 工作原理

DVR 串联在电网和负载之间, 能够快速跟踪电网电压波动, 在毫秒级时间内完成电压的补偿, 减小电网电压波动对负载的影响, 保证用户侧的电压质量。DVR 主要由储能单元、逆变单元、滤波耦合单元和控制单元四部分组成^[8-9], 如图 1 所示。

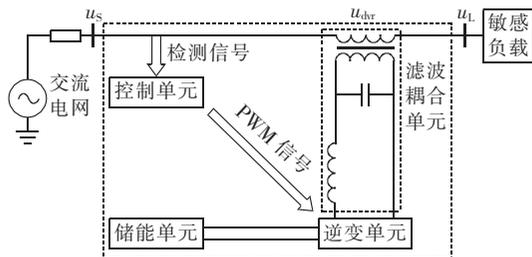


图 1 DVR 典型结构框图

Fig.1 Typical structure of DVR

图中, u_s 为电网电压, u_{dvr} 为 DVR 补偿电压, u_L 为负载电压。DVR 工作时, 控制单元实时检测电网电压, 并快速计算出补偿电压, 产生 PWM 脉冲信号, 逆变单元根据 PWM 脉冲信号, 产生补偿电压, 经过滤波耦合单元后, 串联入电网和负载之间, 从而保证敏感负载的电压稳定^[10]。

2 新型 DVR 系统设计

2.1 新型 DVR 主电路结构

本文提出一种可连续运行级联多电平 DVR, 采用相电压补偿式, 三相系统分别独立, 可以有效解决三相不平衡问题。其单相电路图如图 2 所示。

储能单元选用电容储能, 电网相电压经过隔离变压器、二极管整流电路后, 维持各直流电容电压的稳定, 这种整流供电结构可以有效保证装置的长时间连续运行。若采用 PWM 整流电路替代二极管整流电路, 则该 DVR 就能补偿电网电压骤升。然而, 在配网中出现电压骤升的概率较少, 出于成本考虑, DVR 通常仅补偿电网电压跌落。当检测到电网电压升高时, 将补偿电压设为零, 并用旁路开关将 DVR 旁路, 从而防止直流电容电压升高。

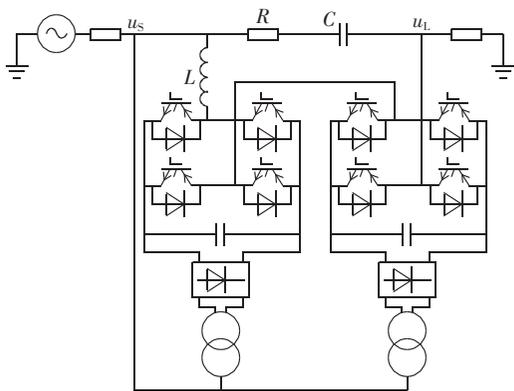


图 2 新型 DVR 单相电路图

Fig.2 Single-phase circuit of new-type DVR

逆变单元主电路采用级联多电平结构, 每相均由 2 个 H 桥功率单元级联而成, 选用绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 作为功率开关器件; 结合载波移相脉宽调制 (PWM) 技术, 可成倍减少器件的开关频率, 有效降低装置的功耗, 同时可有效减少逆变单元输出电压的谐波含量, 简化滤波器设计^[11]。

DVR 的耦合方式主要有变压器耦合和电容耦合 2 种方式。当采用升压变压器作为耦合单元时, 可以降低装置的电压等级, 用于电压等级较高的场合, 提高系统的可靠性; 但变压器的非线性特性给这种耦合方式带来了许多不足, 主要表现为高次谐波压降、变压器相移、易饱和、占地面积大等^[12]。为克服这些缺陷, 本文采用电容耦合方式, 图 2 中 L 、 R 、 C 构成滤波耦合单元。

2.2 补偿策略

DVR 常见的补偿策略主要有完全补偿法、最小能量补偿法、同相补偿法 3 种^[13-14]。完全补偿法的补偿效果最好, 能够同时补偿电压幅值和相位, 但当电压跌落幅值较大或相位偏移较多时 DVR 消耗的直流侧能量较多, 经济性较差; 最小能量补偿法消耗的直流侧能量最少, 但只能补偿电压幅值, 且补偿后会带来电压相位跳变; 同相补偿法的补偿电压与跌落后的电网电压相位相同, 因此只能补偿幅值, 无法补偿相位, 但通常负荷具有一定的抗相位扰动能力, 因此本文采用同相补偿法对电网电压的幅值进行补偿。其相量图如图 3 所示。

图中, U 为跌落前电网电压, 也为跌落前负载电

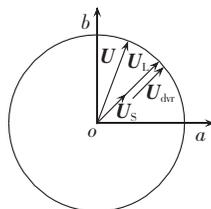


图 3 同相补偿法相量图

Fig.3 Phasor diagram of in-phase compensation

压,当电网电压发生波动,跳变为 U_s 时,DVR 快速检测到电压变化,发出与 U_s 同相位的补偿电压 U_{dvr} ,将负载电压补偿为 U_L , U_L 与跌落后电网电压 U_s 同相位。DVR 能够对电网电压幅值进行补偿,保证负载侧电压质量稳定。

2.3 补偿电压计算方法

本文所述为连续运行 DVR,因此需在实时检测电网电压的基础上,快速计算出补偿电压。常见的电压检测算法有:峰值检测法、有效值法、缺损电压法、基波分量法、dq 检测法、小波分析法等^[15]。前 4 种方法实时性较差,小波分析法计算量较大,不利于实际应用。基于瞬时无功功率理论的 dq 检测法能够实时跟踪电网电压,快速检测出电网电压变化,应用于实时性要求较高的 DVR 中,具有无可比拟的优势。

基于瞬时无功功率理论的 dq 检测法^[16]是将三相静止 abc 坐标系下的电网电压变换到两相同步旋转 dq 坐标系下,变换后,电网电压中的第 N 次正序分量变换成第(N-1)次正序分量,第 N 次负序分量变换成第(N+1)次负序分量。将变换后的电压通过低通滤波器,所得直流分量即为电网电压基波正序的 d 轴、q 轴分量,由此可计算出电网电压基波正序的幅值。低通滤波器通常采用二阶巴特沃斯低通滤波器^[16],其滤波效果和实时性难以同时兼顾,因此在三相不平衡时,二次负序分量会使滤波效果受到影响。本文采用改进的 dq 变换计算 DVR 的补偿电压,实现方法如图 4 所示。

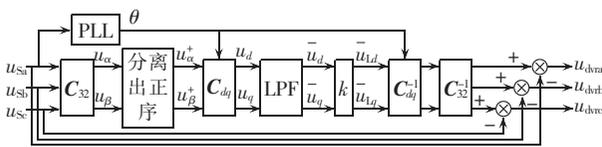


图 4 改进的 dq 变换原理框图

Fig.4 Block diagram of improved dq transformation

这种改进的 dq 变换原理是^[16]:首先根据式(1)将三相静止 abc 坐标系下的电网电压 $[u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]^T$ 变换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下。

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}, \quad C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

当忽略电网电压的谐波分量时,利用式(2)可以准确分离出 u_{α}, u_{β} 中的正序分量,从而有效避免负序分量对滤波效果造成的影响。

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ \dot{u}_{\beta} \\ u_{\beta} \\ \dot{u}_{\alpha} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\dot{u}_{\alpha}, \dot{u}_{\beta}$ 为 u_{α}, u_{β} 对 θ 的导数, $\theta = \omega t, \omega$ 为电网电

压基波角频率。

根据式(3)对分离出的正序分量 $u_{\alpha}^+, u_{\beta}^+$ 进行 dq 变换,再经低通滤波器后得到电网电压基波正序的 d 轴、q 轴分量 \bar{u}_d, \bar{u}_q 。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = C_{dq} \begin{bmatrix} u_{\alpha}^+ \\ u_{\beta}^+ \end{bmatrix}, \quad C_{dq} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据同相补偿法原理,有:

$$k = \frac{\sqrt{2} U_L}{\sqrt{\bar{u}_d^2 + \bar{u}_q^2}} \quad (4)$$

其中, U_L 为负载额定电压。

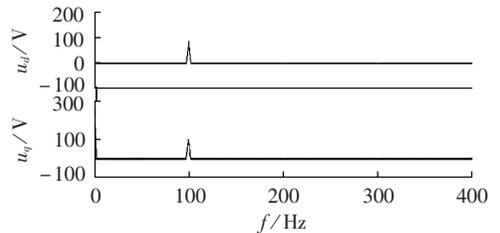
将电网电压基波正序分量乘以系数 k 后,得到补偿后负载电压的 d 轴、q 轴分量 $\bar{u}_{ld}, \bar{u}_{lq}$,再反变换回三相 abc 坐标系,与电网电压相减后即可得到 DVR 所需补偿的电压 $[u_{dvra} \ u_{dvrb} \ u_{dvrc}]^T$ 。综上,采用这种电压补偿算法的 DVR 可补偿电网电压跌落、电网电压谐波以及三相电网电压不平衡。

3 仿真分析

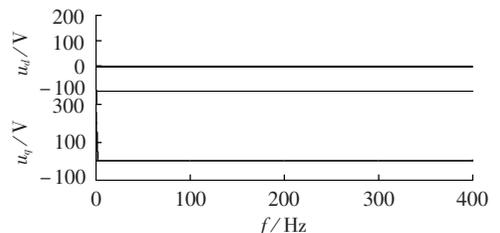
采用 PSIM 软件对本文所述 DVR 进行仿真。仿真步长为 $1 \mu s$,系统正常运行时三相电网电压有效值为 220 V,频率为 50 Hz,由于仿真波形三相对称,以下仅给出单相波形。

3.1 改进 dq 仿真

在电网电压中注入峰值为 100 V 的基波负序电压和峰值为 100 V 的基波零序电压,此时电网电压不对称,经 dq 变换后的 FFT 分析如图 5 所示。



(a) 传统 dq 变换的 d 轴、q 轴分量 FFT 分析



(b) 改进 dq 变换的 d 轴、q 轴分量 FFT 分析

图 5 d 轴、q 轴分量 FFT 分析

Fig.5 FFT analysis of d-axis and q-axis components

由图 5 可见,传统 dq 变换下 d 轴、q 轴分量含有 2 次谐波分量,改进 dq 变换下 d 轴、q 轴分量仅含有直流分量,说明通过式(2)可以完全提取出正序分量。

在电网电压中注入峰值为 100 V 的基波负序电

压、峰值为 30 V 的正负序 3 次谐波电压和峰值为 30 V 的正负序 5 次谐波电压,此时电网电压不对称并含有少量谐波,经 dq 变换后的 FFT 分析如图 6 所示。

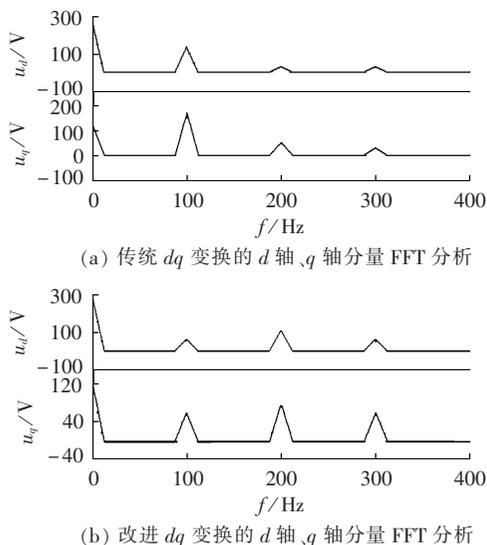


图 6 d 轴、 q 轴分量 FFT 分析

Fig.6 FFT analysis of d -axis and q -axis components

从图 6 中可以看出,传统 dq 变换输出中含有幅值较高的 2 次谐波分量,而改进 dq 变换输出中 2 次谐波分量有所衰减,对数字滤波器截止频率的要求可适当放宽;除 2 次谐波分量外,其他谐波分量有所增大,但这些频率段已经远离截止频率,数字滤波器能够很好地滤除这些频段的谐波分量。由此说明,在电网电压含有少量谐波的情况下,通过式(2)进行正、负序分离造成的误差不大,利用改进 dq 变换能够改善滤波器设计。

3.2 电压跌落补偿仿真

当仿真运行到 0.04 s 时电网基波电压瞬时跌落 50%,在 0.1 s 时恢复正常,其波形如图 7(a)所示。DVR 检测到电压变化,快速发出补偿电压,负载电压几乎没有发生跌落,如图 7(b)所示。

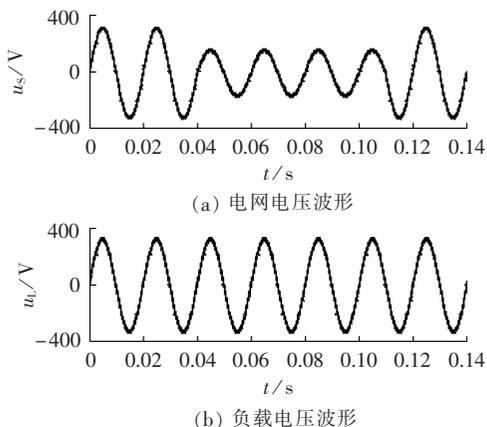


图 7 电压跌落补偿仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of voltage drop compensation

3.3 电压谐波补偿仿真

当仿真运行到 0.04 s 时,对电网注入 30% 的 3 次和 30% 的 5 次谐波电压,在 0.1 s 时恢复正常。图 8(a)为补偿前电网电压的波形及其频谱,图 8(b)为 DVR 输出的补偿电压波形,图 8(c)为补偿后负载的电压波形及其频谱。

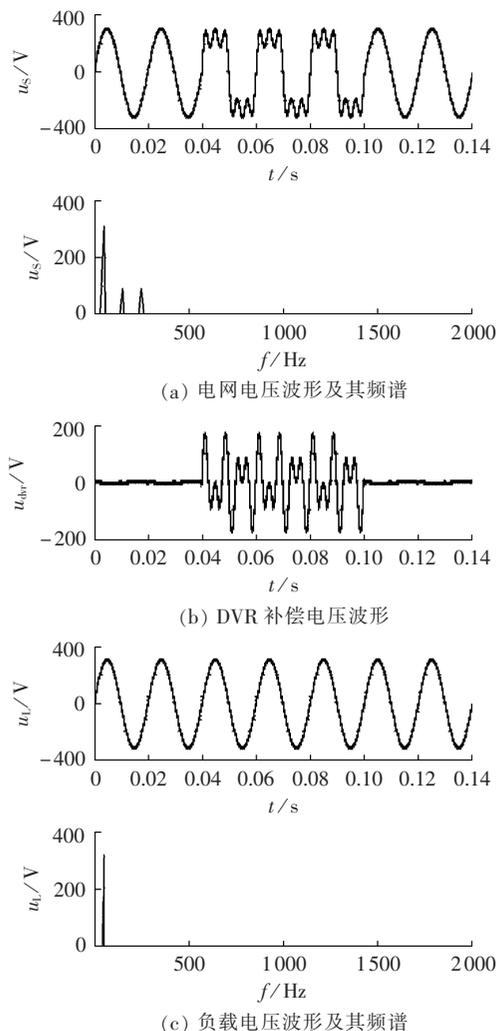


图 8 电压谐波补偿仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms of voltage harmonics compensation

DVR 实时检测电网电压变化,在电网电压发生畸变前,没有补偿量产生;当电网电压发生畸变时,DVR 快速响应,发出补偿电压,使负载侧电压仍为正弦波。

4 实验结果

本文在完成理论分析和软件仿真的基础上搭建了一台三相 380 V 的 DVR 样机,并进行了电网电压长期偏低、电压跌落、电压谐波等问题的补偿实验。实验系统图如图 9 所示,通过在电网端串联电阻,可以模拟电网电压跌落。由于实验波形三相对称,以下仅给出单相波形。

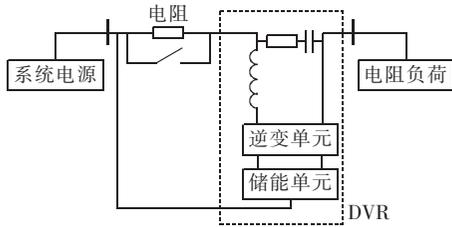


图 9 实验系统图
Fig.9 Experiment system

4.1 电压偏低实验

通过在电网进线端串联电阻,模拟电网电压长期偏低的情况,实验波形如图 10 所示。补偿前电网电压有效值为 122 V,较正常值跌落了 44.5%,经过 DVR 补偿后的负载电压有效值稳定在 220 V 附近,且负载电压与电网电压相位相同,说明补偿没有带来相位差。

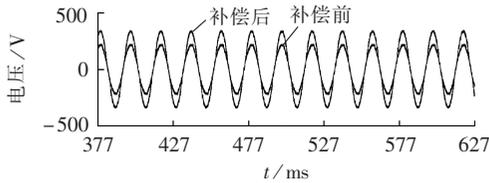


图 10 电压偏低实验波形
Fig.10 Experimental waveforms of low-voltage compensation

4.2 电压瞬时跌落实验

电网正常运行在 220 V 附近,投入串联电阻,使模拟电网电压瞬时跌落至 122 V,实验波形如图 11 所示。DVR 快速响应,在毫秒级时间内完成了电网电压跌落的补偿,补偿后的负载电压几乎没有受到电网电压瞬时跌落的影响。

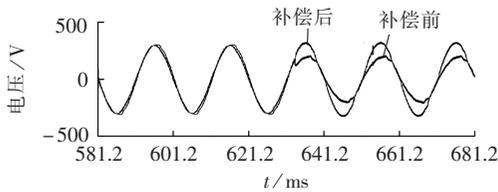
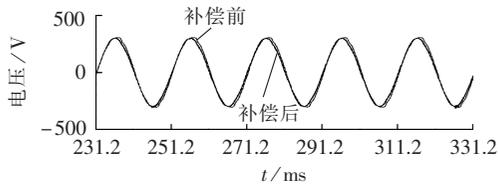


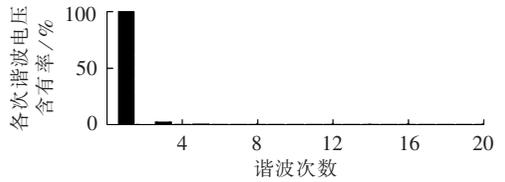
图 11 电压瞬时跌落实验波形
Fig.11 Experimental waveforms of voltage drop compensation

4.3 电压谐波实验

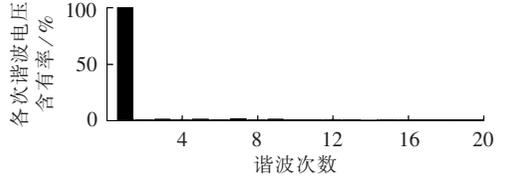
电网电压谐波补偿实验结果如图 12 所示。补偿前,电网电压中含有 3.1% 的 3 次谐波,补偿后,负载电压中的 3 次谐波含量降至 0.42%,充分证明该 DVR



(a) 电压谐波实验波形



(b) 电网电压频谱



(c) 负载电压频谱

图 12 电压谐波实验结果

Fig.12 Experimental results of voltage harmonics compensation

具有补偿电压谐波的能力。

5 结论

本文提出的新型可连续运行级联多电平 DVR,采用相电压补偿方式,三相相互独立。主电路应用级联多电平技术,易于实现模块化,降低了开关频率和装置损耗,减少了输出电压谐波含量。采用同相补偿法,引入改进的 dq 变换计算补偿电压,使得该装置具有补偿电网电压跌落、电网电压谐波以及三相电网电压不平衡的能力。仿真及实验结果表明,本文提出的新型 DVR 能够实时跟踪电网电压,快速计算出补偿电压,在毫秒级时间内完成电网电压补偿,有效保证了负载侧的电压质量。

参考文献:

- [1] 蔡林海,荆平. 动态电压恢复器控制策略研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(11):22-25.
CAI Linhai, JING Ping. Control strategies of dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 22-25.
- [2] ABI-SAMRA N, CARNOVALE D, SUNDARAM A, et al. The role of the distribution system dynamic voltage restorer in enhancing the power at sensitive facilities[C]//Proceedings of WESCON. Anaheim, CA, USA: [s.n.], 1996: 167-181.
- [3] 郝晓弘,杜先君,陈伟. 动态电压恢复器(DVR)研究现状与发展综述[J]. 科学技术与工程,2008,8(5):1259-1267.
HAO Xiaohong, DU Xianjun, CHEN Wei. Survey on research dynamic voltage restorer[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(5): 1259-1267.
- [4] 赵剑锋,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 Jianfeng, JIANG Ping, TANG Guoqing. Research on VSI-based uninterrupter dynamic voltage restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 88-92.
- [5] 赵艳雷. 动态电压恢复器逆变单元的研究与实现[D]. 北京:中国科学院电工研究所,2006.
ZHAO Yanlei. Study on research and implementation of dyna-

- mic voltage restorer's inverter unit[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [6] LOH P C, VILATHGAMUWA D M, TANG S K, et al. Multilevel dynamic voltage restorer[C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Singapore: [s.n.], 2004: 1673-1678.
- [7] 周雪松, 何杰, 马幼捷, 等. 级联多电平技术在动态电压恢复器中的研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1189-1194.
ZHOU Xuesong, HE Jie, MA Youjie, et al. Cascade multi-level technology for dynamic voltage restorer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1189-1194.
- [8] 向龙瑞. 动态电压恢复器控制技术与仿真[D]. 天津: 天津理工大学, 2006.
XIANG Longrui. Research and simulation on control technologies of dynamic voltage restorer[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2006.
- [9] 彭春萍, 陈允平. 动态电压恢复器及其检测方法的探讨[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 68-71.
PENG Chunping, CHEN Yunping. Study of dynamic voltage restorer and its detecting method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 68-71.
- [10] TANDJAOUI M N, BENACHAIBA C, ABDELKHALEK O, et al. Sensitive loads voltage improvement using dynamic voltage restorer[C]//Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Informatics. Bandung, Indonesia: [s.n.], 2011: 1-5.
- [11] 尹忠东, 周丽霞, 于坤山. 2 MVA 无串联变压器级联多电平动态电压调节器的设计与仿真[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 80-84.
YIN Zhongdong, ZHOU Lixia, YU Kunshan. System design and simulation of 2 MVA cascaded multilevel dynamic voltage restorer without series-transformer[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 80-84.
- [12] 余小闯. 动态电压恢复器的补偿策略研究与仿真分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
YU Xiaochuang. Research and simulation analysis on compensation strategy of dynamic voltage restorer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [13] 周雪松, 张智勇, 马幼捷, 等. 动态电压恢复器检测方法 with 补偿策略的研究[J]. 电力电子技术, 2006, 4(3): 123-125.
ZHOU Xuesong, ZHANG Zhiyong, MA Youjie, et al. Research on detection methods and compensation strategies for dynamic voltage restorer[J]. Power Electronics, 2006, 4(3): 123-125.
- [14] 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.
- [15] 孙红雨. 动态电压恢复器检测与控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
SUN Hongyu. Detection of dynamic voltage restorer and control strategy[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [16] 杨新华, 郭志成. 动态电压恢复器电压跌落检测[J]. 低压电器, 2011(5): 51-54.
YANG Xinhua, GUO Zhicheng. Voltage sag detection in dynamic voltage restorer[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(5): 51-54.

作者简介:

王宝安(1978-), 男, 江苏扬州人, 副教授, 博士, 从事电能质量、电力电子在电力系统中的应用研究(E-mail: wbaseu@seu.edu.cn);

孟庆刚(1986-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 从事电能质量方面的研究。

Simulation and experiment of new-type dynamic voltage restorer

WANG Baoan¹, MENG Qinggang¹, SHANG Jiao¹, HUANG Xueliang¹, LIU Wei²

(1. Electrical Engineering School, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: A new-type uninterrupted dynamic voltage restorer is proposed, which adopts multi-level topology in its main circuit and locates between grid and load via capacitor coupling. Grid voltage is isolated by transformer and rectified to supply DC capacitor. The in-phase compensation is applied for the magnitude compensation of grid voltage and the improved dq transformation for the calculation of compensation voltage. Simulation with software PSIM and experiment of a prototype demonstrate that, the proposed dynamic voltage restorer compensates the voltage drop and voltage harmonics of power grid quickly and effectively, ensuring the power quality at load side.

Key words: uninterrupted dynamic voltage restorer; cascaded multi-level; in-phase compensation; improved dq transformation; compensation; voltage control