

基于双 dq 变换软件锁相的动态电压恢复器研究

陈琦¹, 熊良根², 刘述军³, 姚亮¹

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 华东电力设计院, 上海 200063;
3. 江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘要: 动态电压恢复器是一种新型的电能质量调节装置, 它能有效地抑制电网电压波动对敏感负载的影响。针对在电网畸变以及不对称跌落的情况下, 动态电压恢复器需要准确地捕获基波电压正序相位。采用了一种双 dq 变换软件锁相环(DDSRF-PLL), 不仅能够快速有效地检测电网电压在对称、不对称、不对称且畸变情况下正序基波电压的相位, 为动态电压恢复器提供准确的锁相角, 同时也具备较好的动态性能, 使动态电压恢复器获得较好的补偿结果。在 Matlab/Simulink 中建立了带超级电容的动态电压恢复器的仿真模型, 仿真结果验证了双 dq 变换软件锁相在动态电压恢复器的有效性和可行性。

关键词: 动态电压恢复器; DDSRF-PLL; 电压不平衡; 软件锁相环; 电网同步

Research of dynamic voltage restorer based on double dq synchronous software phase-locked loop

CHEN Qi¹, XIONG Lianggen², LIU Shujun³, YAO Liang¹

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. East China Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China; 3. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: Dynamic Voltage Restorer (DVR) is a new type of power quality regulating device by which the influence of voltage fluctuation on sensitive loads can be effectively suppressed, under voltage distortion of power network it is necessary to capture the phase of positive sequence fundamental component of voltage accurately. A new decoupled double synchronous reference frame PLL (DDSRF-PLL) is used by which the phase of positive sequence fundamental component of voltage can not only be accurately detected under the condition that in the power system three phases balance sag, unbalance sag, unbalance sag and distorted, but also obtain good dynamic performance, that provide accurate lock phase angle for DVR. Thus a better compensation effect can be achieved by DVR, the simulation model of DVR with super capacitor is built in Matlab/Simulink. The correctness and effectiveness of the proposed method is verified by the simulation results.

Key words: DVR; DDSRF-PLL; voltage unbalance; soft phase locked loop; power synchronization

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0087-07

0 引言

动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)是为敏感型负载供电的新型电力电子装置, 主要用于消除供电电网产生的电压跌落、闪变、以及谐波对电能质量的影响^[1]。动态电压恢复器在工作过程中的控制指令与电网电压相位密切相关, 电网电压的相位一般通过锁相环(Phase Locked Loop, PLL)来获取^[2-5]。PLL是一种能够实现两个电信号相位同步的自动控制闭环系统, 目前, 在电力电子装置中广泛应用的锁相环一般有两种方式。

一是采用硬件电路检测电网电压过零点求得相位差信号, 用硬件电路实现锁相。在正常情况下, 每个工频周期内电网电压只有两个过零点, 这使得锁相速度受到限制, 另外在电网电压畸变情况下, 硬件电路锁相很难准确检测到过零点, 使得PLL输出的相位产生振荡^[6-7]。

二是采用基于同步旋转坐标变换的软件锁相环(Soft Phase Locked Loop, SPLL)。传统的单相 dq 变换SPLL对三相对称电压的锁相非常有效^[8], 但在三相不对称电压跌落过程中不能有效进行锁相。当电网电压出现畸变时, 适当的降低SPLL带宽可以获得

较为准确的相位信息, 但是其动态响应速度降低。文献[9]提出了在锁相回路中加入巴特沃斯低通滤波器的方法, 通过低通滤波器来抑制锁相回路中的低频谐波分量, 其仿真和实验证明该方法能够显著提高电网不平衡和存在谐波的锁相精度。文献[10]采用DSC(Delay Signal Cancellation)SPLL技术, 这种方法需要占用较多的存储单元。

在DVR中, 准确、快速的电压检测是其关键之一, 在常用的电压跌落检测方法几乎都用到了锁相环技术, 来锁定电网电压正序分量的相位, 以此获得与电源电压同相位的标准正弦信号, 锁相环性能的好坏在某种程度上决定了DVR系统性能的好坏。基于坐标变换理论^[11-13], 本文采用了一种基于双dq变换新数字软件锁相技术(DDSRF-PLL), 在Matlab/Simulink搭建了基于DDSRF-PLL锁相的DVR仿真模型, 仿真结果表明在电网电压对称跌落、不对称跌落、电压暂降及畸变情况下, DDSRF-PLL都能快速、准确地锁定基波正序电压的相位。验证了DDSRF-PLL锁相的准确性以及其在DVR控制策略中的有效性。

1 DDSRF-PLL 锁相原理

DDSRF-PLL 包括两个旋转坐标系, 如图 1 所示, 其中正向同步旋转 $d^{+1}q^{+1}$ 坐标系以 ω 角速度逆时针旋转, 初始角度为 θ , 而负序同步旋转 $d^{-1}q^{-1}$ 坐标系是以 $-\omega$ 的角速度顺时针旋转, 初始角度为 $-\theta$ 。

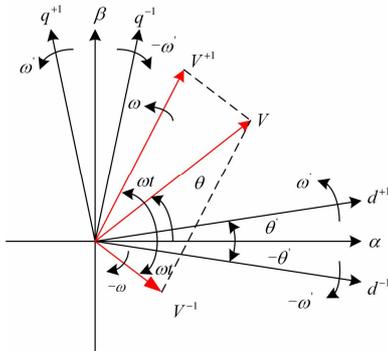


图 1 基于 DDSRF 的电压矢量图

Fig. 1 Phasor diagram of DDSRF

电压矢量 V 可分解为正序矢量 V^{+n} 和负序矢量 V^{-m} , 因此 V 表示为

$$V_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = V_{\alpha\beta}^{+n} + V_{\alpha\beta}^{-m} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} V^{+n} + \begin{bmatrix} \cos(-\omega t) \\ \sin(-\omega t) \end{bmatrix} V^{-m} \quad (1)$$

分别通过正向同步 dq 坐标变换系和反向同步

dq 坐标变换系后, 可得 dq 坐标系中的正序电压矢量 V_{dq}^{+n} 和负序电压矢量 V_{dq}^{-m} 。

$$V_{dq}^{+n} = \begin{bmatrix} V_d^{+n} \\ V_q^{+n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{dq}^{+1} \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} V^{+n} + \begin{bmatrix} \cos \theta' & \sin \theta' \\ -\sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ -\sin(\omega t) \end{bmatrix} V^{-m} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta') \\ \sin(\omega t - \theta') \end{bmatrix} V^{+n} + \begin{bmatrix} \cos(-\omega t - \theta') \\ \sin(-\omega t - \theta') \end{bmatrix} V^{-m} \quad (2)$$

当 $\omega t \approx \theta'$ 时, 存在

$$\begin{cases} V_d^{+n} = \underbrace{V^{+n}}_{\text{DC}} + \underbrace{V^{-m} \cos(-2\theta')}_{\text{AC}} \\ V_q^{+n} = \underbrace{V^{+n} \sin(\omega t - \theta')}_{\text{DC}} + \underbrace{V^{-m} \sin(-2\theta')}_{\text{AC}} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{dq}^{-m} = \begin{bmatrix} V_d^{-m} \\ V_q^{-m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{dq}^{-1} \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' \\ \sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} V^{+n} + \begin{bmatrix} \cos \theta' & -\sin \theta' \\ \sin \theta' & \cos \theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ -\sin(\omega t) \end{bmatrix} V^{-m} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta') \\ \sin(\omega t + \theta') \end{bmatrix} V^{+n} + \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta') \\ \sin(\omega t - \theta') \end{bmatrix} V^{-m} \quad (4)$$

当 $\omega t \approx \theta'$ 时, 存在

$$\begin{cases} V_d^{-m} = \underbrace{V^{-m}}_{\text{DC}} + \underbrace{V^{+n} \cos(2\theta')}_{\text{AC}} \\ V_q^{-m} = \underbrace{V^{-m} \sin(\omega t - \theta')}_{\text{DC}} + \underbrace{V^{+n} \sin(2\theta')}_{\text{AC}} \end{cases} \quad (5)$$

从式(3)和式(5)可以看出, 正负序 dq 分量存在交叉耦合的二倍频分量。为了消除二倍频分量, 可以对其进行解耦计算, 解耦原理如下: 将正反向 dq 变换模块输出的直流分量交叉反馈给反正向 dq 变换模块, 并与输入信号进行叠加处理^[13]。

考虑电网电压存在谐波影响同步锁相的精度, 引入低通高阻滤波LPF环节

$$LPF(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \quad (6)$$

其中, ω_f 为低通滤波器截止频率。

对双向 dq 变换的输出信号进行滤波, 得到正负序 dq 分量。对正向 q 轴分量采用类似单 dq 变换的 PLL 锁相原理即可实现在电网电压对称、不对称以及电压畸变情况下的相位锁相, 图 2 为 DDSRF-SPLL 的原理框图。

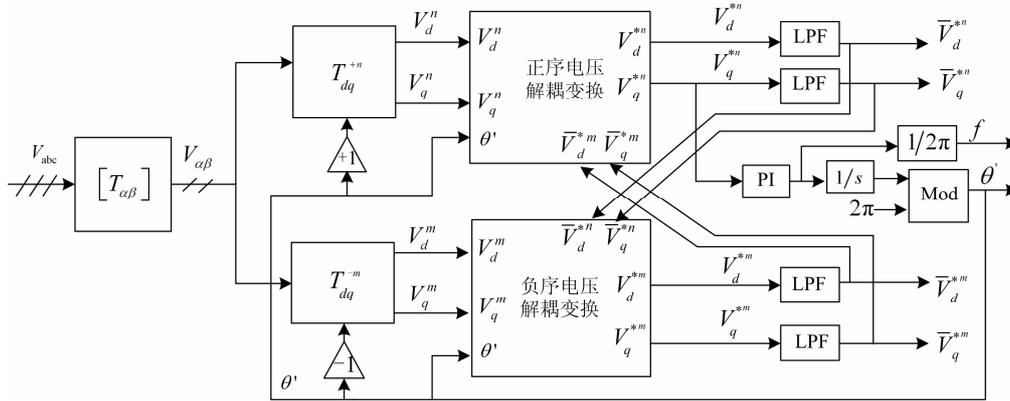


图 2 DDSRF-PLL 的原理框图
Fig. 2 Function block diagram of DDSRF-PLL

2 DVR 结构及整体控制策略

2.1 DVR 拓扑结构

DVR 可以等效为一个受控电源, 它可在电源和敏感负载之间加入任意幅值、相位的电压。当电网发生故障或者畸变情况下, 通过改变 DVR 的电压可以使敏感负载电压保持恒定。带储能系统的 DVR 基本结构如图 3 所示, 整个 DVR 系统由超级电容、DC-DC 双功率流变换器、直流母线电容、电压源变流器、滤波回路以及串联耦合变压器组成。

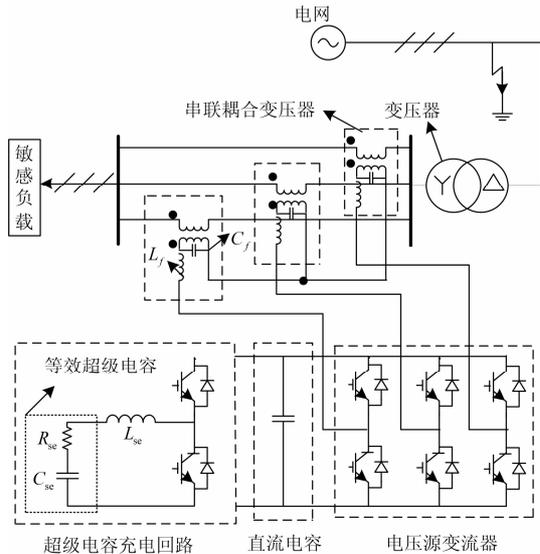


图 3 带超级电容的 DVR 拓扑结构

Fig. 3 Topology of DVR with super capacitor

2.2 DVR 控制策略

在图 3 所示中, 敏感负载为三相制系统, 且电网经过由 Y/Δ 变压器进行降压, 因此, 在高压发生故障以及畸变情况下, 低电压侧没有零序分量, 因此只考虑正序、负序的补偿分量, 采用完全补偿方

式, DVR 的补偿电压可以表示为

$$\begin{bmatrix} V_{DVR}^{a*} \\ V_{DVR}^{b*} \\ V_{DVR}^{c*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{pcc,presag}^a & -V_{pcc}^a \\ V_{pcc,presag}^b & -V_{pcc}^b \\ V_{pcc,presag}^c & -V_{pcc}^c \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $V_{pcc,presag}^a$ 、 $V_{pcc,presag}^b$ 、 $V_{pcc,presag}^c$ 为电压跌落前时刻公共连接 PCC 点电压; V_{pcc}^a 、 V_{pcc}^b 、 V_{pcc}^c 为电压跌落时刻 PCC 点电压; V_{DVR}^{a*} 、 V_{DVR}^{b*} 、 V_{DVR}^{c*} 为提供给 DVR 的补偿指令电压。

比例谐振控制器(proportional resonant, PR)在交流信号上可以获得零稳态误差^[14-15], 其传递函数为

$$H_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad (8)$$

式中: K_p 及 K_i 分别为 PR 控制器的比例参数及谐振参数; ω_c 为拓宽 PR 控制器在谐振频率点处的带宽, 使 PR 控制器在反馈量发生频率偏移时也能对其进行有效控制; ω_e 为理论谐振频率。

在静止坐标系 $\alpha\beta$ 下, DVR 补偿电压采用 PR 控制器进行控制, 其输出电压 V_{out} 可以表示为

$$V_{out} = H_{PR}(V_{DVR}^{\alpha\beta*} - V_{DVR}^{\alpha\beta}) = \left(K_p + \frac{2K_i\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \right) (V_{DVR}^{\alpha\beta*} - V_{DVR}^{\alpha\beta}) \quad (9)$$

基于 PR 控制器的 DVR 补偿控制策略框图如图 4 所示。

2.3 DC-DC 变换器控制

如图 5 所示, 超级电容通过斩波电路与直流侧电容相连接, 双向 DC-DC 变换器控制超级电容器的充放电来实现对直流侧母线电压的控制。当电网电压故障情况下, DC/DC 变换器工作在 Boost 模式, 超级电容器对直流母线电容放电, 直流侧电容电压回升, 从而维持直流母线电压正常, 以完成补偿负

载所需电压。双向 DC-DC 变换器控制原理如图 6 所示。

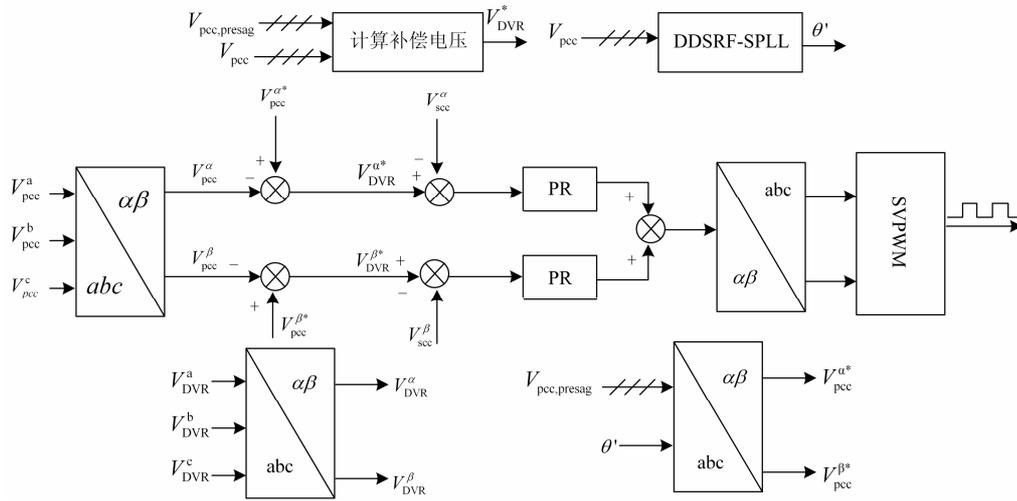


图 4 DVR 控制框图

Fig. 4 Control diagram of DVR

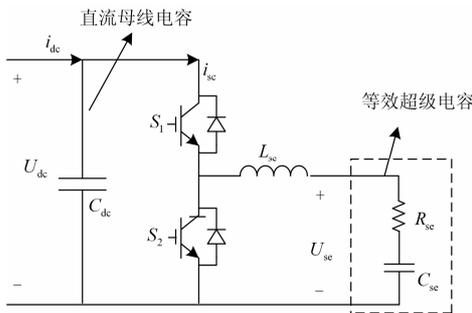


图 5 DC-DC 变换结构图

Fig. 5 Structure of the DC-DC converter

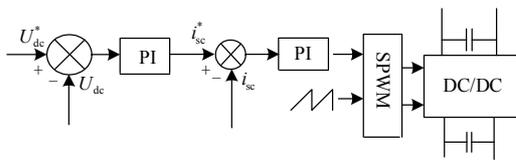


图 6 DC-DC 变换控制图

Fig. 6 Diagram of the DC-DC converter control

3 仿真分析

为验证 DDSRF-SPLL 锁相技术在 DVR 中的控制算法的有效性，本文依据图 3 主电路和图 4 的控制策略，在 Matlab/Simulink 中搭建了仿真模型。分别在对称电压跌落、不对称电压跌落以及不对称且畸变情况下进行仿真，电压跌落起始时刻为 0.2 s，故障持续时间为 0.2 s，仿真模型的主要参数如表 1 所示。

表 1 DVR 仿真主要参数

Table 1 Simulation parameters of the DVR	
敏感负载电压/容量	690 V/2 kW
串联耦合变压器变比	600 V/600 V
滤波电容(C_f)	10 μ F
滤波电感(L_f)	2 mH
储能电感(L_{sc})	6 mH
直流母线电容(C_{dc})	9 400 μ F
超级电容(C_{sc})	9.4 F
超级电容电压初值(U_{sc})	900 V
直流电容电压初值(U_{dc})	1 500 V

3.1 对称电压跌落

图 7 为变压器高压侧对称电压跌落及补偿波形，在 0.2 s 电压跌落前，公共连接 PCC 点电压正常，DVR 为闭锁模式，输出补偿电压约为 0 V，超级电容以及直流母线电容都维持在初始值，图 8(a)可知在故障发生约 10 ms DDSRF-SPLL 实现了对故障电网正序电压的准确锁相，同时启动 DVR 进行补偿，补偿电压如图 7(b)所示。图 7(c)、7(d)看出补偿后负载电压电流维持在正常情况。由于补偿电压的能量由超级电容通过 DC/DC 变换器进行控制，超级电容电压减少，直流母线电容一直维持在额定电压 1 500 V 左右。图 8(b)看出故障恢复后约 7 ms DDSRF-SPLL 实现了与电网电压正序相位的同步，同时 DVR 进入闭锁模式。

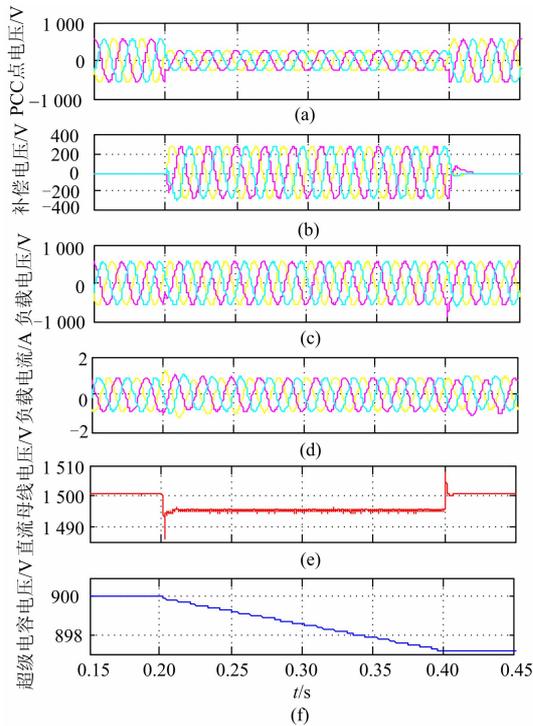


图7 对称跌落补偿波形

Fig. 7 Compensation under symmetric dip

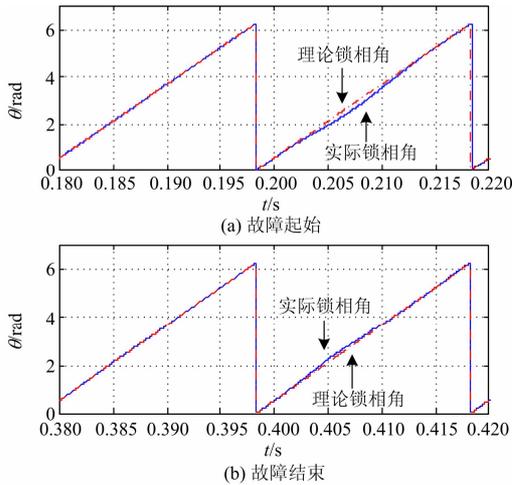


图8 对称跌落锁相波形

Fig. 8 Waveform under symmetric dip

3.2 不对称电压跌落

在电网故障中主要以不对称电压跌落为主, 模拟了变压器高压侧在 0.2 s 时刻发生 A 相跌落 50%, 图 9(a) 为 PCC 点电压波形, 从图 10(a) 仿真波形看出 DDSRF-SPLL 在故障发生后约 7 ms 实现了对故障电网电压正序分量的准确锁相, 同时 DVR 启动补偿, 补偿后负载电压电流都维持在正常情况。由于需要补偿负序电压分量, 直流母线电容电压出现倍频分量, 在补偿过程中超级电容通过 DC/DC 变

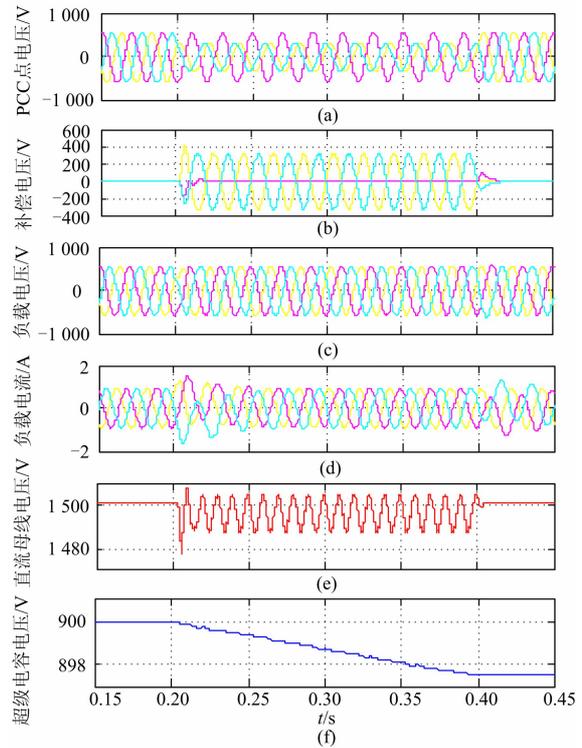


图9 不对称跌落补偿波形

Fig. 9 Compensation under asymmetric dip

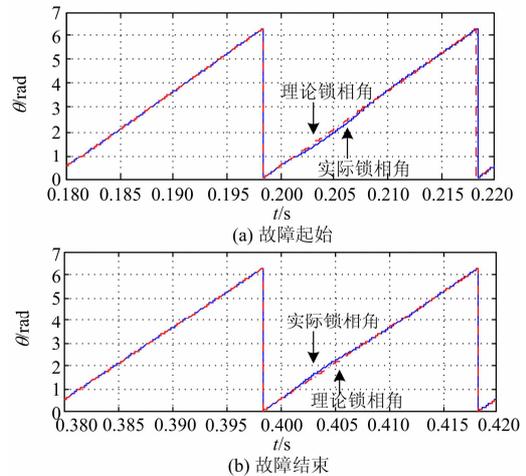


图10 不对称跌落锁相波形

Fig. 10 Waveform under asymmetric dip

换器释放能量, 超级电容中亦出现倍频分量。图 10(b) 为在故障恢复后约 5 ms DDSRF-SPLL 实现了与电网电压正序相位的同步, DVR 进入闭锁旁路模式。

3.3 不对称电压跌落且畸变

敏感负载除受电网故障影响外, 还受电网谐波的干扰, 对变压器高压侧在 0.2 s 发生单相接地, 并在 0.1 s 至 0.45 s 时段加入 5 次和 7 次谐波, 幅值均为基波幅值的 10%。从故障起始和结束图 11、图 12 出在 0.1 至 0.2 s, DVR 输出相应的电压来消

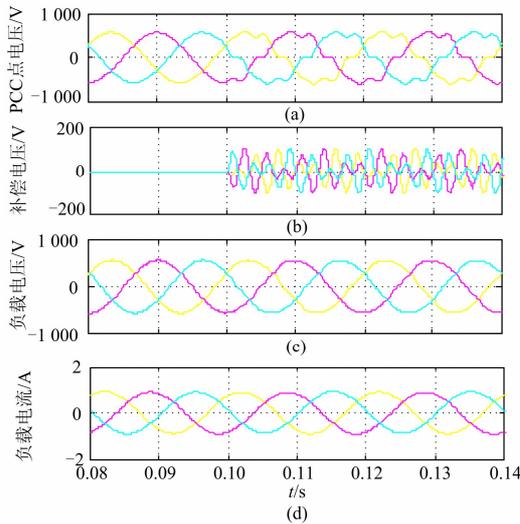


图 11 故障起始时刻补偿波形

Fig. 11 Compensation waveform at the initial time

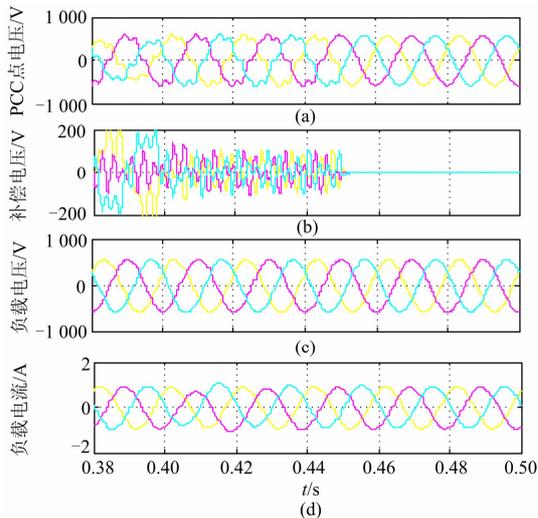


图 12 故障结束时刻补偿波形

Fig. 12 Compensation waveform at the end time

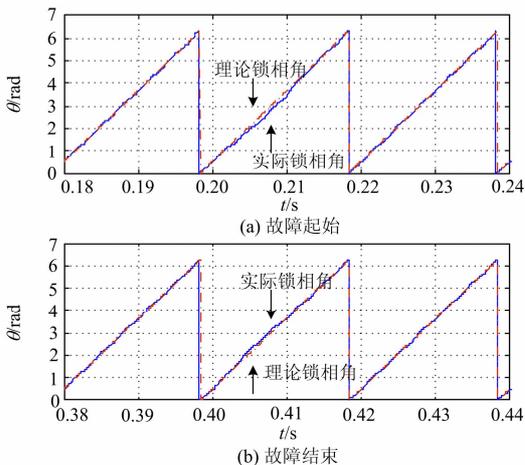


图 13 不对称跌落且畸变下锁相波形

Fig. 13 Waveform under asymmetric dip and distortion

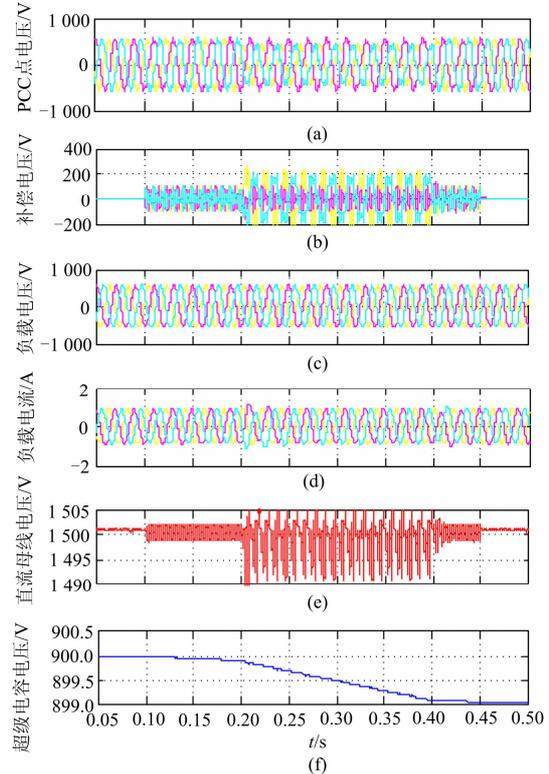


图 14 不对称跌落且畸变下补偿波形

Fig. 14 Compensation waveform under asymmetric dip and distortion

除谐波的影响,在 0.2 s 至 0.4 s 电网 A 相接地, PCC 点电压不对称跌落且畸变, DVR 输出补偿电压, 维持敏感负载的电压和电流。从图 13 看出在故障发生及恢复约 10 ms 左右 DDSRF-SPLL 跟踪了电网电压正序相位。整体补偿效果见图 14, 在不对称电压跌落及畸变补偿中, 直流电容有脉动分量, 主要是为消除 PCC 点负序分量及谐波分量的影响。

4 结论

基于双坐标变换理论, 本文采用 DDSRF-PLL 锁相技术对 DVR 的公共连接 PCC 点进行锁相, 在 Matlab/Simulink 中建立了基于 DDSRF-PLL 锁相的动态电压恢复器仿真模型, 仿真结果表明在 PCC 点三相对称电压跌落、三相不对称电压跌落、三相不对称跌落且畸变情况下 DVR 都能很好的对敏感负载进行补偿, 验证了 DDSRF-PLL 能够较好的满足 DVR 的锁相的检测要求, 从而为分布式发电系统通过电力电子装置接入电网同步锁相提供了一种借鉴方法。

参考文献

- [1] 李彦栋, 王凯斐, 卓放, 等. 新型软件锁相环在动态电压恢复器中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 42-45.

- LI Yandong, WANG Kaifei, ZHUO Fang, et al. New phase locked loop technique in dynamic voltage restorer [J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 42-45.
- [2] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-150.
WANG Jing, XU Aiqin, WENG Guoqing, et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 145-150.
- [3] 郭东. 动态电压恢复器的锁相与控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008: 23-24.
GUO Dong. Research on phase locked method and control strategy for dynamic voltage restorer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008: 23-24.
- [4] 杨新华, 郭志成. 动态电压恢复器软件锁相技术[J]. 电力系统自动化设备, 2011, 31(11): 56-59.
YANG Xinhua, GUO Zhicheng. Soft PLL technique of dynamic voltage restorer[J]. Electric power Automation Equipment, 2011, 31(11): 56-59.
- [5] 罗小莉, 杨宇. 动态电压质量问题检测方法[J]. 电力系统自动化设备, 2007, 37(1): 115-118.
LUO Xiaoli, YANG Yu. Detection method of dynamic voltage quality[J]. Electric power Automation Equipment, 2007, 37(1): 115-118.
- [6] 刘海春, 徐立智, 谢少军. 一种新的过零锁相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 147-150.
LIU Haichun, XU Lizhi, XIE Shaojun. A new phase locking method with zero crossing[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 147-150.
- [7] 裴喜平, 郝晓弘, 陈伟, 等. 电网电压不对称故障下软件锁相技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 80-84.
PEI Xiping, HAO Xiaohong, CHEN Wei, et al. SPLL technique in grid voltage asymmetry fault[J]. Electric power Automation Equipment, 2012, 32(9): 80-84.
- [8] 张治俊, 李辉, 张熙, 等. 基于单/双同步坐标系的软件锁相环建模和仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 138-144.
ZHANG Zhijun, LI Hui, ZHANG Xu, et al. Simulation and modeling of software phase-locked loop based on single/double synchronous coordinate system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 138-144.
- [9] 周国梁, 石新春, 付超. 三相电压畸变条件下软件锁相环分析与实现[J]. 电力电子技术, 2007, 41(7): 47-49.
ZHOU Guoliang, SHI Xinchun, FU Chao. Operation of a software phase locked loop under distorted three-phase voltage[J]. Power Electronics, 2007, 41(7): 47-49.
- [10] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于空间矢量的基波正序、负序分量及谐波分量的实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 1-5.
ZHANG Guibin, XU Zheng, WANG Guangzhu. Study and simulation of real-time detecting method for fundamental positive sequence, negative sequence components and harmonic components based on space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 1-5.
- [11] RODRIGUZE P, BERGS J P J. Decoupled double synchronous reference PLL for power converters control[J] IEEE Transactions on power Electronics, 2000, 22(2): 584-592.
- [12] 王颢雄, 马伟明, 肖飞, 等. 双dq变换软件锁相环的数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 237-241.
WANG Haoxiong, MA Weiming, XIAO Fei, et al. Study of model of soft ware phase locked-loop based on dual-dq synchronous transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 237-241.
- [13] 周鹏, 贺益康, 胡家兵. 电网不平衡下风电机组运行控制中电压同步信号的检测[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 108-113.
ZHOU Peng, HE Yikang, HU Jiabing. Detection of voltage synchronization signals for a wind energy generation system unbalanced grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 108-113.
- [14] HU Jiabing, HE Yikang. Reinforced control and operation of DFIG-based wind-power generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2009, 24(4): 905-915.
- [15] 黄建明, 吴春华, 许富强. 基于相序解耦谐振控制器的基波正序电压相位检测方法[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 667-672.
HUANG Jianming, WU Chunhua, XU Fuqiang. Phase detection of fundamental positive sequence voltage based on sequence-decoupled resonant control[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 667-672.

收稿日期: 2014-05-19

作者简介:

陈琦(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事继电保护与控制技术领域的研发工作; E-mail: carl-qi.chen@sac-china.com

熊良根(1984-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统及功率变换器相关设计工作; E-mail: xionglg2011@163.com

刘述军(1984-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统及微电网设计相关工作。

(编辑 张爱琴)