

# 动态电压恢复器的时间优化补偿策略研究

党存禄<sup>1,2</sup>, 严 鋈<sup>1</sup>, 张晓英<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 动态电压恢复器(DVR)是缓解电压跌落问题最经济、有效的用户电力装置, 它的补偿能力指标是持续补偿时间。以补偿电压跌落时DVR装置的最大持续补偿时间为控制目标, 通过调整负荷电压超前跌落电网电压的相位角 $\beta$ , 提出一种新的时间优化补偿策略。为减轻DVR运行时对负荷的扰动, 使补偿开始和结束的暂态过程更平稳, 新策略采取了 $\beta$ 按恒定步长 $\Delta\beta$ 缓慢变化的控制方法, 并根据DVR装置的 $T-\beta$ 曲线, 通过判断特定量符号决定 $\beta$ 角的补偿方向。此种 $\beta$ 角控制方法避免直接求解 $\beta$ 的最优解, 计算量小。仿真结果证明, 新策略能获得比最小能量补偿策略更长的DVR持续补偿时间, 有效利用了DVR的直流母线储能。

**关键词:** 电能质量; 电压跌落; 动态电压恢复器(DVR); 补偿策略; 时间优化补偿

## Analysis of time optimal compensation strategy for dynamic voltage restorer

DANG Cun-lu<sup>1,2</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ying<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Process, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Dynamic voltage restorer (DVR) has been considered to be a cost-effective custom power device, which alleviates voltage sags. The compensation capability index for DVR is compensation duration. To maximize compensation duration of DVR device when compensated voltage sags, a novel time optimal compensation strategy is proposed, and the novel strategy is implemented by controlling the phase angle  $\beta$  between load voltage phasor and supply voltage phasor. In order to reduce disturbances to loads and smoothen transient processes at the beginning and end of compensation, the proposed strategy adopts a control method that  $\beta$  changes progressively by constant step  $\Delta\beta$  and determines the compensating direction by identifying signs of specific variables, according to  $T-\beta$  curve. This control method for  $\beta$  avoids directly computing optimal  $\beta$  and has less calculation. The simulation results illustrate that the proposed strategy can obtain longer compensation duration and utilize more DC-link energy for DVR, compared with minimum energy compensation strategy.

This work is supported by Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 0809RJZA004) and Excellent Youth Teacher Foundation of Lanzhou University of Technology (No. Q200814).

**Key words:** power quality; voltage sag; dynamic voltage restorer(DVR); compensation strategy; time optimal compensation

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0011-06

## 0 引言

在众多电能质量问题中, 电压跌落所占比例最大, 已上升为最重要的电能质量问题<sup>[1-2]</sup>。发生电压跌落的原因是多方面的, 当输配电系统中发生短路故障、感应电动机启动、雷击、开关操作、变压器及电容器组的投切等事件时, 均可引起电压跌落。

其中, 短路故障和感应电动机启动是引起电压跌落的主要原因, 并以短路故障引起的电压跌落最为严重<sup>[3-4]</sup>。可见, 电压跌落问题在输配电系统中无法避免, 然而它所引起的经济损失是巨大的<sup>[5]</sup>。目前, 动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)被认为是缓解电压跌落问题最经济、有效的用户电力装置<sup>[6-8]</sup>。理想的DVR工作原理是: 当电网侧发生电压跌落后, 以跌落前负荷侧的电压作为参考电压, 输出补偿电压, 使负荷侧的电压与跌落前保持

**基金项目:** 甘肃省自然科学基金资助项目(0809RJZA004); 兰州理工大学优秀青年教师培养资助项目(Q200814)

一致。DVR 在输出补偿电压的同时与系统有一定的有功交换，为了保证 DVR 能有效抑制电压跌落并减少有功交换，则需要对 DVR 的补偿电压进行优化控制，使 DVR 在一定补偿能力的前提下获得最大的补偿范围。显然，DVR 输出的补偿电压受电压跌落深度、持续时间、负载特性、功率因数以及本身容量等因素的影响。目前研究和应用的电压跌落补偿策略主要有跌落前电压补偿法、同相电压补偿法和最小能量补偿法。跌落前电压补偿法的补偿效果最好，对于那些对电压幅值和波形连续性要求很高的敏感性负荷是最佳补偿策略；而同相电压补偿法的补偿电压幅值最小，且易于实现，是普遍应用的电压补偿策略<sup>[9]</sup>。从能量角度考虑，文献[10]提出最小能量补偿策略，有效减少了 DVR 的注入有功功率，延长了 DVR 的补偿时间。文献[11]考虑负荷侧电压相位跳变的影响，提出一种改进的最小能量补偿策略，解决了负荷侧电压相位大幅跳变的问题。文献[12]针对不平衡电压跌落的特点，考虑不同性质负荷对电压幅值和相移的容忍范围，提出了新的最小能量补偿策略。

最小能量补偿策略以 DVR 的注入有功功率最小为控制目标，目的是延长 DVR 的持续补偿时间。但是，当 DVR 的最小注入有功功率不为零时，DVR 采用最小能量补偿策略不再获得最大持续补偿时间。因此，本文直接从补偿时间角度考虑，以补偿电压跌落时 DVR 的最大持续补偿时间为控制目标，提出一种时间优化补偿策略。与最小能量补偿策略相比，该策略更有效利用了 DVR 的直流母线储能，能获得更长的持续补偿时间。

### 1 最小能量补偿与时间优化

图 1 所示的单相量图说明了 DVR 的最小能量补偿策略，图中： $\dot{U}_L$  为电压跌落前负荷侧电压相量， $\dot{U}_S$  为电压跌落后电网侧电压相量； $i$  表示负荷电流； $\dot{U}_{DVR}$  表示动态电压恢复器在最小能量方式下的注入电压； $\phi$  为负荷功率因数角； $\beta$  为电压跌落补偿时负荷侧电压超前电网侧电压的相角。设  $\phi = \pi/3$ ，记电压幅值比  $(U_L - U_S) / U_L$  为电压跌落深度。此时，不考虑 DVR 的电压补偿极限，当电压跌落深度小于 50% 时，通过旋转  $\dot{U}_S$  相量至  $\dot{U}'_S$ ，总可以找到  $\beta$  角使 DVR 的注入有功功率  $P_{DVR}$  为零，即图 1 (a)；当电压跌落深度大于 50% 时，如图 1 (b) 所示，即使设  $\beta = \phi$  也不可能使  $P_{DVR}$  减小到零，此时  $P_{DVR}$  取大于零的最小值。

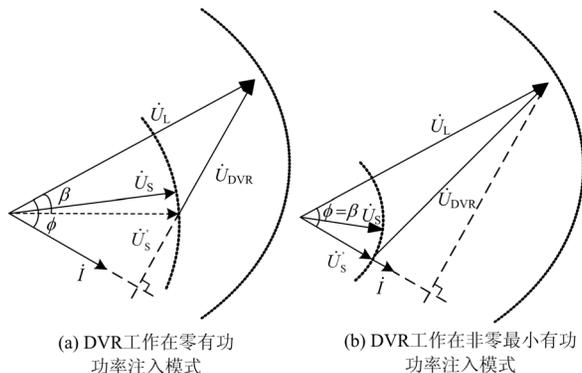


图 1 最小能量补偿策略相量图

Fig.1 Phasor diagram of minimum energy compensation strategy

动态电压恢复器的时间优化补偿策略与最小能量补偿策略之间既有联系又有本质区别。毫无疑问，在图 1 (a) 所示情况下，DVR 不向电网注入能量，持续补偿时间  $T$  在理想情况下为无穷大值（记  $T_{max} = \infty$ ），此时 DVR 的工作状态既是能量最优也是时间最优，时间优化补偿策略与最小能量补偿策略等同。然而，当电压跌落深度大于 50% 时，时间优化补偿策略与最小能量补偿策略之间有本质区别，如图 2 所示。图 2 中，最小能量方式下的注入电压  $\dot{U}_{DVR\_E}$  含有有功分量，于是  $\dot{U}_{S1}$  向  $\beta$  角减小的方向旋转得  $\dot{U}_{S2}$  和  $\dot{U}_{DVR\_T}$ ，并有  $\dot{U}_{DVR\_E}$  与  $\dot{U}_{DVR\_T}$  的相量幅值差  $\Delta U_{DVR}$  及相量有功分量差  $\Delta U_{DVR\_P}$  产生。此时，假设  $i$  为单位相量，则  $\Delta U_{DVR\_P}$  的量值与两种补偿方式下 DVR 的注入有功功率差  $\Delta P_{DVR}$  相等，从图中可以看出  $\Delta U_{DVR} > \Delta P_{DVR}$ 。已有文献表明，DVR 的注入有功功率越大越不利于延长补偿时间，而注入电压幅值越小越有利于延长补偿时间，即

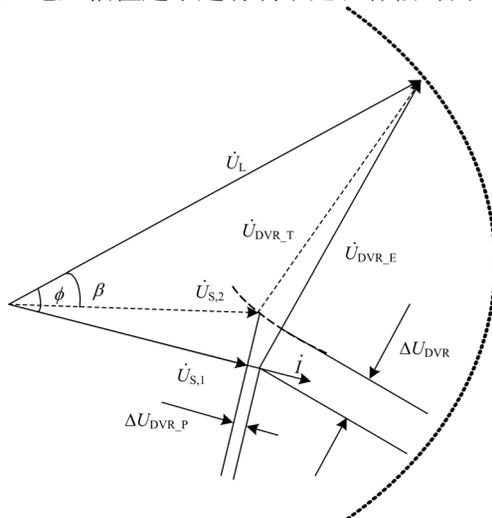


图 2 时间优化补偿策略相量图

Fig.2 Phasor diagram of time optimal compensation strategy

$T \propto \frac{\Delta V_{\text{DVR}}}{\Delta P_{\text{DVR}}}$ , 则一定存在特定的  $\beta^*$  使得 DVR 获得

最大持续补偿时间。这就是时间优化补偿策略的思想。

## 2 三相对称系统中 DVR 的时间优化补偿

对三相系统, 设负荷为三相对称星形连接, 功率和功率因数恒定, 则 DVR 的任一相注入电压幅值  $U_{\text{DVR}}^j$  及三相注入有功功率  $P_{\text{DVR}}$  表示为<sup>[13]</sup>:

$$U_{\text{DVR}}^j = \sqrt{U_L^2 + U_{Sj}^2 - 2U_L U_{Sj} \cos \beta_j} \quad (1)$$

$$P_{\text{DVR}} = 3U_L I \cos \phi - \sum_{j=1}^3 U_{Sj} I \cos(\phi - \beta_j) \quad (2)$$

式中,  $j$  表示三相电压中的任一相。

对于有储能装置的 DVR, 直流电容器是最常见的储能方式<sup>[7]</sup>。当发生电压跌落时, DVR 通过直流电容器放电向电网注入能量。设  $C$  为电容器容量,  $V_{\text{dcmax}}$  为直流电容器最大允许充电电压,  $V_{\text{dcmin}}$  为 DVR 补偿时所需最小直流电容器电压, 则电压跌落补偿时直流电容器的能量变化量为<sup>[14]</sup>:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C \sum_{j=1}^3 [V_{\text{dcmax}}^2 - (V_{\text{dcmin}}^j)^2] \quad (3)$$

$$\text{式中, } V_{\text{dcmin}}^j = \sqrt{2} U_{\text{DVR}}^j \quad (4)$$

此时, DVR 的持续补偿时间为:

$$T = \frac{\Delta E}{P_{\text{DVR}}} = \frac{\frac{1}{2} C \sum_{j=1}^3 [V_{\text{dcmax}}^2 - 2(U_L^2 + U_{Sj}^2 - 2U_L U_{Sj} \cos \beta_j)]}{3U_L I \cos \phi - \sum_{j=1}^3 U_{Sj} I \cos(\phi - \beta_j)} \quad (5)$$

根据文献[1]结论: 三相对称系统发生两相电压跌落时(假设为 A、B 相), 跌落相电压幅值  $U_{\text{Sa}}=U_{\text{Sb}}$ , 且相位角  $\beta_a=\beta_b$ ; 同理, 三相系统发生三相对称电压跌落时,  $U_{\text{Sa}}=U_{\text{Sb}}=U_{\text{Sc}}$ ,  $\beta_a=\beta_b=\beta_c$ 。由此, 式(5)可改写为  $T-\beta$  函数:

$$T = \frac{\frac{1}{2} C [V_{\text{dcmax}}^2 - 2(U_L^2 + U_S^2 - 2U_L U_S \cos \beta)]}{U_L I \cos \phi - U_S I \cos(\phi - \beta)} \quad (6)$$

要求得  $T$  的极大值, 首先应求  $T$  对  $\beta$  的导数,

并解方程  $\frac{dT}{d\beta} = 0$ 。其表达式为:

$$\frac{dT}{d\beta} =$$

$$\frac{CU_S I \sin(\phi - \beta) (\frac{1}{2} V_{\text{dcmax}}^2 - U_S^2 - U_L^2 + 2U_S U_L \cos \beta)}{[U_L I \cos \phi - U_S I \cos(\phi - \beta)]^2} - \frac{2CU_S U_L \sin \beta}{U_L I \cos \phi - U_S I \cos(\phi - \beta)} = 0 \quad (7)$$

式(7)可由程序求解, 并得到  $[-\pi, \pi]$  范围内的 2 个解, 记为  $\beta_1=\beta^*$ ,  $\beta_2=\beta'$  ( $|\beta_2|>|\beta_1|$ )。但当且仅当  $\beta \in [0, \phi]$  时  $T$  的取值有意义, 即方程的解  $\beta=\beta^*$  为 DVR 在时间优化补偿方式下的最优角。

图 3 以跌落后剩余值为 40% 的三相对称电压跌落为例分别作出  $P_{\text{DVR}}-\beta$  曲线和  $T-\beta$  曲线, 此时设  $\phi = \pi/3$ 。由图可知, 当  $\beta=\pi/3$  时 DVR 的注入有功功率  $P_{\text{DVR}}$  最小, 当  $\beta=0.9547$  时 DVR 的持续补偿时间  $T$  最优(长)。

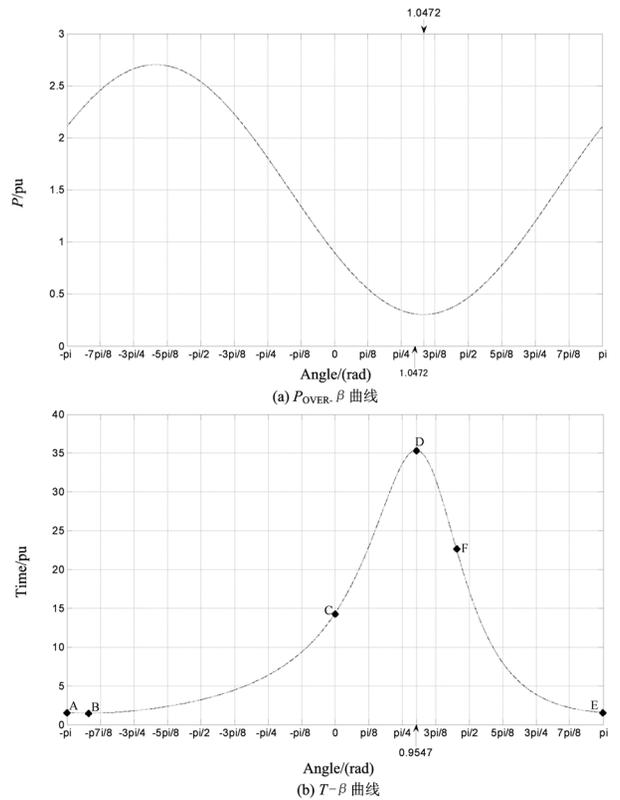


图 3  $P_{\text{DVR}}-\beta$  曲线和  $T-\beta$  曲线

Fig.3  $P_{\text{DVR}}-\beta$  curve and  $T-\beta$  curve

基于以上分析, 采用时间优化补偿策略应首先求解时间最优角  $\beta^*$ , 即由式(7)得出在  $[-\pi, \pi]$  范围内的 2 个  $\beta$  值, 选择绝对值小的值作为时间最优角; 然后, 根据  $\beta^*$  的值将  $\beta$  缓慢变化到最优角  $\beta^*$ , 以使得补偿后的负荷侧电压相位变化最小。

### 3 改进的 $\beta$ 角控制方法

前节所述的  $\beta$  角控制方式需要计算最优角  $\beta^*$  的值, 而式 (7) 的求解过程复杂, 计算量很大。为此, 本文提出一种计算量较小的  $\beta$  角控制方法。当不考虑 DVR 注入电压极限时,  $\beta$  在 1 个周期内任意取值, 可以使  $\beta$  在整个电压跌落过程中都以恒定步长  $\Delta\beta$  变化。如图 3 所示, 将曲线上的点称为 DVR 的运行点。补偿时遵循的原则是使 DVR 运行时获得最大持续补偿时间, 而且  $\beta$  的改变量尽量小。

对曲线  $T-\beta$ , 通过判断  $\frac{dT}{d\beta}$  以及  $\beta$  的符号, 可以判断  $\beta$  的运行区间, 并决定  $\beta$  的变化方向, 使  $\beta$  按恒定步长  $\Delta\beta$  变化到最优角  $\beta^*$ , 如表 1 所示。

表 1 曲线  $T-\beta$  在 1 个周期内各运行点的状态  
Tab.1 States of various running point of  $T-\beta$

当前 $\beta$ 所在位置	$\frac{dT}{d\beta}$	当前 $\beta$	$\Delta\beta$ 的符号
A-B	<0	<0	+
B	=0	<0	+
B-C	>0	<0	+
C	>0	=0	+
C-D	>0	>0	+
D	=0	>0	0
D-E	<0	>0	-
E	<0	>0	-

当  $\beta$  运行于 A~D 间, 选择  $\beta$  步长为正的方向补偿; 当  $\beta$  运行于 D~E 间, 选择  $\beta$  步长为负的方向补偿; 当  $\beta$  运行在 D 点时, 运行点保持不变。 $\beta$  的步长  $\Delta\beta$  根据敏感负荷能承受的电压相位变化程度, 以及 1 个周期内的采样点确定。以上提出的  $\beta$  角控制方法, 不直接计算最优角  $\beta^*$ , 只需要在每个采样点判断当前  $\beta$  对应的  $\frac{dT}{d\beta}$  和  $\beta$  的符号, 按表 1 决定补偿方向, 计算量明显减少, 且简单易行。

### 4 考虑注入电压极限的时间优化补偿策略

三相对称系统发生电压跌落, 可按照对称分量法对跌落后电压进行分解。由于 DVR 的能量注入只由正序分量决定, 因此可以采用单相量图进行分析。如图 4 所示,  $DVRM$  为 DVR 注入电压极限,  $\dot{U}_{S1}$  为跌落后正序电压, 则 DVR 的时间优化补偿策略有两种运行方式。

#### 1) $DVRM < U_L - U_{S1}$

此条件下的运行情况如图 4 (a), 由于补偿电压不足以补偿负载电压至额定值, 因而此时的时间

优化补偿策略等同于同相电压补偿策略。

#### 2) $DVRM > U_L - U_{S1}$

此条件下的运行情况如图 4 (b), 此时可以将  $\dot{U}_{S1}$  的幅值补偿回跌落前的水平。要用时间优化补偿策略, 首先需求出  $\beta$  角变化的三相公共范围  $\beta_{cmin} \sim \beta_{cmax}$ , 然后由边界的  $\frac{dT}{d\beta}$  和  $\beta$  的符号判断公共范围所在区域, 按表 1 所示方法得到时间最优角  $\beta^*$ 。如图 3 所示, 假设以下情况: 1)  $\beta_{cmin}$ 、 $\beta_{cmax}$  分别对应 A 点和 C 点, 不包含  $T_{max}$  运行点 D, 则时间最优角  $\beta^*$  运行在 C 点; 2)  $\beta_{cmin}$ 、 $\beta_{cmax}$  分别对应 C 点和 F 点, 包含  $T_{max}$  运行点 D, 则时间最优角  $\beta^*$  运行在 D 点; 3)  $\beta_{cmin}$ 、 $\beta_{cmax}$  分别对应 F 点和 E 点, 不包含  $T_{max}$  运行点 D, 则时间最优角  $\beta^*$  运行在 F 点。

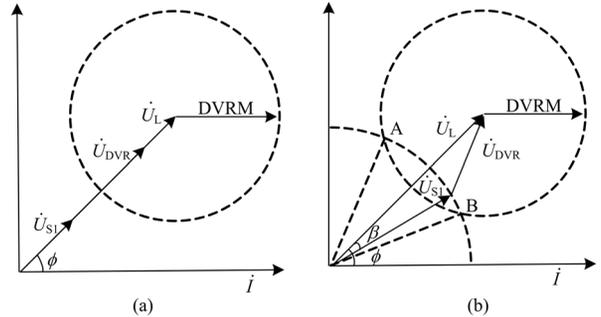


图 4 考虑注入电压极限的时间优化补偿策略相量图

Fig.4 Phasor diagram of time optimal compensation strategy by considering the limitation of injected voltage

### 5 仿真实验

图 5 为直流电容器储能的动态电压恢复器主电路拓扑。三组反向 IGBT 构成交流开关, 当电网电压正常时, 电网直接给负载供电, DVR 不工作; 当电网电压跌落时, 交流开关闭合, 电网电压与 DVR 注入电压相叠加给负载供电。假设三相电网 A 相 0.1~1.4 s 间发生电压跌落, 正常 A 相电压有效值为 220 V, 跌落电压有效值为 88 V,  $\phi = \pi/3$ , 如图 6 (a) 所示。显然, 根据式 (2) 和式 (6), 动态电压恢复器运行时的最小注入有功功率不为零, 若分别采用最小能量补偿和时间优化补偿可得到不同的电压补偿结果。图 6 (b) 即表示采用最小能量补偿策略的补偿系统各点波形, 图 6 (c) 表示采用时间优化补偿策略的补偿系统各点波形, 均以补偿负载电压至有效值为 220 V 作为判断 DVR 补偿能力的依据。由图可见, 采用最小能量补偿策略的持续补偿时间为 0.89 s, 而采用时间优化补偿策略的持续补偿时间为 1.03 s。

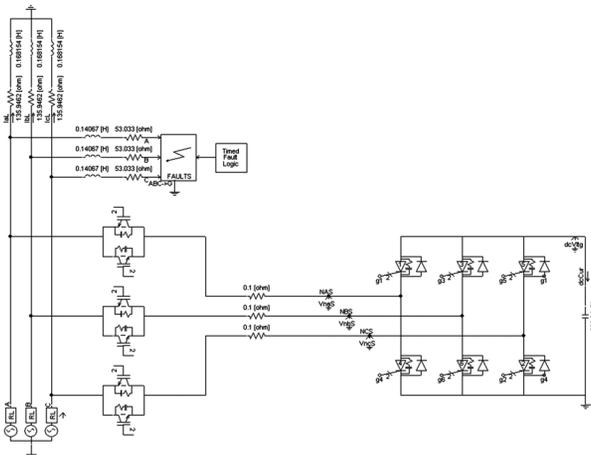


图5 直流电容器储能的动态电压恢复器主电路拓扑  
Fig.5 Topology of DVR with energy storage in DC-link capacitor

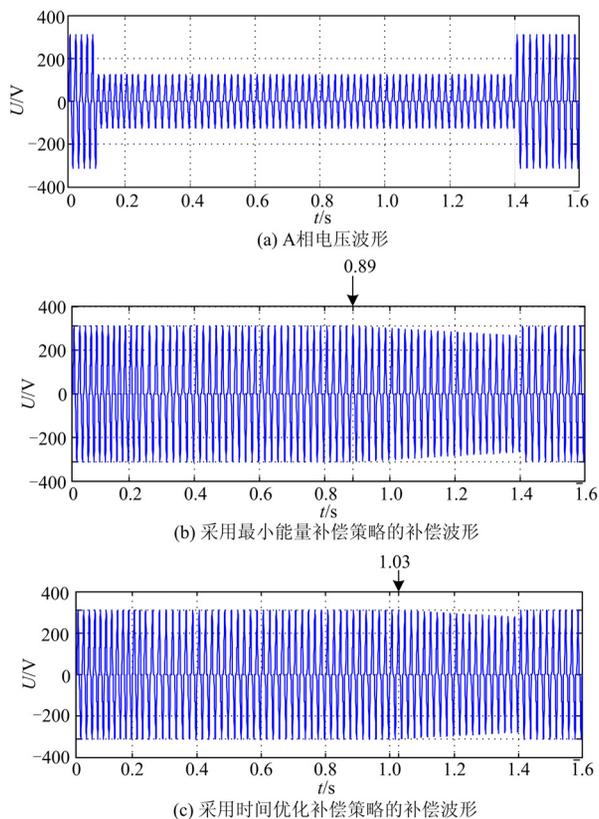


图6 分别采用最小能量补偿策略和时间优化补偿策略的补偿波形

Fig.6 Waveform of minimum energy compensation and time optimal compensation

## 6 结论

本文提出一种时间优化补偿策略, 该策略以补偿电压跌落时 DVR 的最大持续补偿时间为控制目

标, 通过调整跌落电网电压的相位获得一个最佳运行角, 使得 DVR 在运行时获得最大持续补偿时间。分析表明, 时间优化补偿策略与最小能量补偿策略之间既有联系又有区别: 当 DVR 在最小能量补偿方式下注入有功功率为零时, 时间优化补偿策略与最小能量补偿策略等同; 但是, 当 DVR 在最小能量补偿方式下注入有功功率不为零时, 则采用时间优化补偿策略能获得比最小能量补偿策略更长的补偿时间。仿真结果验证了上述分析。

DVR 的时间优化补偿策略是通过控制负荷电压超前跌落电网电压的相角  $\beta$  来实现的。为减轻 DVR 运行时对负荷的扰动, 使 DVR 补偿开始和结束的暂态过程更加平稳, 本文采取了  $\beta$  按恒定步长  $\Delta\beta$  缓慢变化的控制方法, 并根据直流电容器储能型 DVR 装置的  $T-\beta$  曲线提出通过判断特定量符号决定  $\beta$  角的补偿方向。此种  $\beta$  角控制方法避免直接求解  $\beta$  的最优解, 与直接计算最优  $\beta$  角的控制方式相比计算量更小。

## 参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
XIAO Xiang-ning. Analysis and control of power quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 林焱, 吴丹岳, 章雪萌, 等. 电压暂降指标的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 147-152.  
LIN Yan, WU Dan-yue, ZHANG Xue-meng, et al. An exploration on index about voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3):147-152.
- [3] 金燕云, 罗毅, 涂光瑜. 配电系统电压跌落问题的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 56-62.  
JIN Yan-yun, LUO Yi, TU Guang-yu. Study of voltage sags in power distribution system[J]. Relay, 2003, 31(10): 56-62.
- [4] Brumsickle W E, Schneider R S, Luckjiff G A, et al. Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37 (1) : 212-217.
- [5] 韩英铎, 严干贵, 姜齐荣, 等. 信息电力与FACTS及DFACTS技术[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (19) : 1-7.  
HAN Ying-duo, YAN Gan-gui, JIANG Qi-rong, et al. Electric power in information society and FACTS & DFACTS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (19) : 1-7.
- [6] 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): 145-151.  
WANG Jing, XU Ai-qin, WENG Guo-qing, et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System

Protection and Control, 2010, 38(1): 145-151.

[7] 王同勋, 薛禹胜, Choi S S. 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. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (9) :101-107.

[8] 王德发, 丁洪发. 基于不对称级联型多电平逆变器的动态电压恢复器研究[J]. 继电器, 2007, 35(13): 49-52.  
WANG De-fa, DING Hong-fa. Simulation of dynamic voltage restorer based on asymmetry cascade multilevel inverter[J]. Relay, 2007, 35(13): 49-52.

[9] Jauch T, Kara A, Rahmani M, et al. Power quality ensured by dynamic voltage correction[J]. ABB Review, 1998, 4: 25-36.

[10] Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (1) : 51-57.

[11] Li B H, Choi S S, Vilathgamuwa D M. A new control strategy for energy-saving dynamic voltage restoration[C]. //Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle,USA, 2000, 2: 167-181.

[12] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器电压补偿策略的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (6) : 68-72.

FENG Xiao-ming, YANG Ren-gang. Analysis of voltage compensation strategies for dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (6) : 68-72.

[13] Vilathgamuwa D M, Perera A A D R, Choi S S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18 (3) : 928-936.

[14] Nielsen J G, Blaabjerg F. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2005, 41 (5) : 1272-1280.

收稿日期: 2010-03-25; 修回日期: 2010-05-21

作者简介:

党存禄 (1964-), 男, 教授, 本科, 主要研究方向为电气传动、谐波抑制与无功补偿、电压跌落补偿; E-mail: dcl\_1964@163.com

严 鋈 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电压跌落补偿;

张晓英 (1973-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化。

(上接第 5 页 continued from page 5)

LIU Yu-ming. Distribution network fault diagnosis and rapid power restoration algorithms[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

[18] Lee K Y, Park Y M, Ortiz J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1985, 104 (5) : 1147-1153.

[19] Debapriya Das. A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE

Trans on Power Delivery, 2006, 21 (1): 202-209.

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-05-19

作者简介:

李 伟 (1968-), 男, 教授, 在读博士, 研究方向为电力经济分析、技术经济评价理论与应用;

张振刚 (1977-), 男, 经济师, 硕士, 研究方向为电力经济分析、技术经济评价理论与应用。E-mail: zhangzhengangwf@126.com

(上接第 10 页 continued from page 10)

[16] Lee Y, Kozar K A. Investigating the effect of website quality on business success: an analytic hierarchy process approach[J]. Decision Support Systems, 2006, 42 (3) : 1383-1401.

[17] Ngai E W T. Evaluation of knowledge management tools using AHP[J]. Expert Systems with applications, 2005, 29 (4) : 889-899.

[18] Bertolini M, Braglia M. Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract[J]. International Journal of Project Management, 2006, 24 (5) : 422-430.

[19] Odum H T. Systems ecology: an introduction[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.

[20] 刘西陲, 沈炯, 李益国. 系统边际电价概率分布检验

及模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (4) : 72-77.

LIU Xi-chui, SHEN Jiong, LI Yi-guo. Study on probability distribution and model of system marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (4) : 72-77.

收稿日期: 2010-03-23; 修回日期: 2010-05-15

作者简介:

柏小丽 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力市场的研究; E-mail: bxueer2003@eyou.com

雷 霞 (1973-), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事配电自动化和电力市场的研究。E-mail: snow\_lei246@sina.com