

考虑补偿策略的动态电压恢复器补偿量检测方法

张永平, 李 鹏, 李和明

(华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 电压补偿量的检测是影响动态电压恢复器(DVR)实时性和补偿精度的关键环节。为了提高 DVR 的补偿性能, 针对用户对补偿策略选取的不同, 通过引入目标电压函数, 提出改进 $d-q$ 变换法对电压补偿量进行检测。该方法考虑到电压相位跳变、衰减直流分量、谐波和三相不对称等复杂情况的存在, 可以对系统电压跌落的起止时刻、跌落幅值和相位跳变角实时检测, 并结合补偿策略直接检测出需要的电压补偿量。通过仿真分析对所提方法的正确性及应用于 DVR 中的有效性进行了验证。

关键词: 动态电压恢复器; 改进 $d-q$ 变换法; 补偿策略; 电压补偿量; 目标电压函数

中图分类号: TM 761; TM 930 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)01-0008-05

近来, 基于用户电力技术的动态电压恢复器(DVR)可以很好地解决电压跌落、电压突升以及电压谐波等电压质量问题。为了实现 DVR 的实时性及良好的补偿性能, 电压补偿量的检测就显得非常重要。

目前, 提出的各种检测方法应用于 DVR 时都不尽完善, 存在一定的局限性。检测方法主要有^[1]: 电力系统中广泛应用的 FFT 算法, 它对于动态电能质量问题不适合; 自适应干扰对消法^[2]及基于人工神经网络的自适应检测法, 主要是动态性能不够理想, 适合负荷变化缓慢的情况; 缺损电压法^[3]的局限性在于: 该法中跌落电压的幅值和相位的瞬时值确定仍是需要解决的问题^[4]。DVR 补偿策略的应用是要对跌落的幅值和相位实时的检测。基于瞬时功率理论的 $\alpha\beta$ 法^[5]和 $d-q$ 变换方法^[6]物理意义清晰, 易于实现。但应用于 DVR 时有其不足: 不易直接对基波的变化量进行补偿^[7]; 并且没有考虑补偿策略选取的不同而导致补偿量的检测也应该有所不同。

本文对 $d-q$ 变换法进行改进, 可以快速检测出基波电压跌落的幅值和相位的跳变角, 并根据不同的补偿策略直接检测出电压补偿量, 使该方法适用于 DVR 中补偿量的检测。

1 检测原理

1.1 常规 $d-q$ 变换方法

设扰动前三相电压平衡, 电压幅值为标准值, 初相角为 φ_1 。扰动后考虑到一般情况, 发生电压跌落的同时, 伴随有相位的跳变, 并产生了谐波分量和衰减直流分量。则三相电压表示为

$$u_a(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \varphi_1 + \alpha) + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t + \theta_k) + A_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

$$u_b(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \varphi_1 - 2\pi/3 + \alpha) + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2} U_k \sin[k(\omega t - 2\pi/3) + \theta_k] + B_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

$$u_c(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \varphi_1 + 2\pi/3 + \alpha) + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2} U_k \sin[k(\omega t + 2\pi/3) + \theta_k] + C_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式中 $k=2, 3, 4, 5, \dots$; ω 为工频角频率, $\omega = 2\pi f = 100\pi$; U_1 为扰动后基波电压有效值; U_k 为第 k 次谐波有效值; φ_1 为扰动前基波电压初相位; α 为扰动引起的基波电压相位跳变角; θ_k 为第 k 次谐波初相位; A_0, B_0, C_0 分别为三相衰减直流分量的初始值; λ 为衰减系数。

将 a, b, c 三相电压变换到 dq 轴的关系式为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi_1) & A_{12} & A_{13} \\ -\cos(\omega t + \varphi_1) & A_{22} & A_{23} \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_1)$$

$$A_{13} = \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi_1) \quad (5)$$

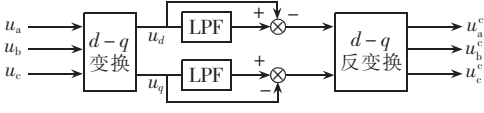
$$A_{22} = -\cos(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_1)$$

$$A_{23} = -\cos(\omega t + 2\pi/3 + \varphi_1)$$

变换阵 $\mathbf{C}$ 中的 $\sin(\omega t + \varphi_1)$, $-\cos(\omega t + \varphi_1)$ 是与扰动前基波分量同相位的正、余弦信号。

a, b, c 三相电压经 $d-q$ 变换后, 基波分量成为直流分量, n 次谐波分量成为 $n-1$ 次谐波分量, 衰减直流分量成为基波分量。

$d-q$ 变化法的检测原理如图 1 所示。

图 1 $d-q$ 变换法检测原理框图Fig.1 Principle diagram of $d-q$ transform detection method

图中 u_a^c, u_b^c, u_c^c 分别为三相电压补偿量的大小。系统侧三相电压通过 $d-q$ 变换后,基波分量经过低通滤波器(LPF)后被滤除,电压谐波、衰减直流分量、不对称分量等电压量再经过 $d-q$ 反变换可以被快速准确地检测出来。

1.2 改进 $d-q$ 变换方法

在原有的 $d-q$ 变换法的基础上添加 2 个环节: 1 个是确定电压有效值和相位跳变角环节;另 1 个是确定目标电压函数环节,使检测算法能对基波电压量补偿,并根据不同的补偿策略,求取不同的补偿量。

1.2.1 电压有效值和相位跳变角的确定

电压有效值的确定可以判断 DVR 投入运行的时间,相位跳变角的确定可以根据不同补偿策略去计算目标电压函数的相位角。

假设电压跌落时,伴随着相位的跳变,则三相电压中基波分量分别变为

$$\begin{aligned} & \sqrt{2} U_{\text{sag}} \sin(\omega t + \varphi_1 + \alpha) \\ & \sqrt{2} U_{\text{sag}} \sin(\omega t + \varphi_1 + \alpha - 2\pi/3) \\ & \sqrt{2} U_{\text{sag}} \sin(\omega t + \varphi_1 + \alpha + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 U_{sag} 为跌落电压的有效值; α 为相位跳变角。

三相电压经过式(4)变换后,通过低通滤波器将直流成分 U_{da}, U_{qa} 提取出来,则可得:

$$U_{da} = \sqrt{3} U_{\text{sag}} \cos \alpha \quad (7)$$

$$U_{qa} = -\sqrt{3} U_{\text{sag}} \sin \alpha \quad (8)$$

U_{da}, U_{qa} 是实际测量值,则可以计算出电压跌落的幅值和相位跳变角为

$$U_{\text{sag}} = \sqrt{3}/3 \sqrt{U_{da}^2 + U_{qa}^2} \quad (9)$$

$$\alpha = -\arctan(U_{qa}/U_{da}) \quad (10)$$

1.2.2 目标电压函数的确定

目标电压函数即敏感负荷侧电压经过 DVR 补偿后要达到的电压量。它是一个三角函数,幅值为标准相电压幅值,本文中设为 $220\sqrt{2}$ V,相角是由扰动前基波电压初相角 φ_1 、扰动引起的相位跳变角 α 以及补偿策略共同确定的。

设三相目标电压函数为

$$\begin{aligned} u_a'(t) &= 220\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1 + \beta) \\ u_b'(t) &= 220\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1 + \beta - 2\pi/3) \\ u_c'(t) &= \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1 + \beta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\beta + \varphi_1$ 为 a 相目标电压函数的相位角,其中 φ_1

为扰动前 a 相电压的相位角,而 β 则主要由相位跳变角和补偿策略确定。

选取的补偿策略不同是因为不同的敏感用户对电压的要求是不一样的,这涉及到补偿容量的问题。

a. 跌落前电压补偿法:这种补偿策略是将电压跌落补偿到跌落前的电压幅值和相位,使负载侧的电压和发生电压跌落前一致,它的补偿效果是最理想的,适用于那些对电压幅值和波形连续性要求很高的负荷,它能保证跌落前后用户电压的连续性,即要求相位不发生变化($\beta = 0$)。

b. 同相位补偿:保持补偿电压和跌落电压同相位。在电压跌落发生相移时,补偿后的电压与发生跌落前的电压有相位差。特点是输出电压幅值最小。此方法适用于负载对电压幅值敏感而对相位不敏感的场所。它要求若电压发生相位跳变即 $\alpha \neq 0$, 补偿目标的相位 β 也随之发生变化即 $\beta = \alpha$ 。

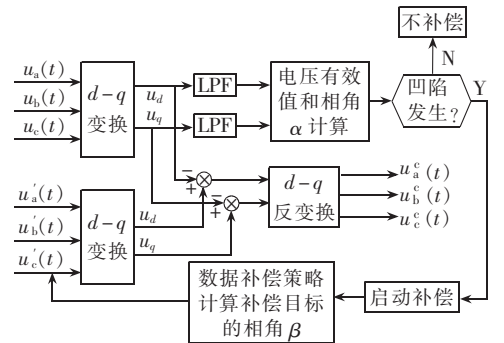
c. 最小能量补偿策略:当补偿电压和负载电流之间的夹角为 90° 时,即补偿电压和负载电流垂直时,注入有功功率最小为零。这只是理想情况,由于受到补偿范围限制和电压跌落程度的影响,补偿电压有时不能正好和负载电流垂直,但总有一个能量最小点^[8],这种补偿策略输出的能量最小,对 DVR 容量的要求最低。但输出电压比较大,且有相位偏移。最优角的选取要根据负载功率因数和跌落电压幅值及相位跳变角综合考虑。

前面 1.2.1 中已经算出相位突变的角度 α ,再根据补偿策略的选取,计算出 β 的大小。这样三相目标电压函数就确定了。

1.2.3 补偿量的确定

目标电压函数确定后,通过 $d-q$ 变换,并将变换的值与系统侧电压经过 $d-q$ 变换后的值相减,最后经过 $d-q$ 反变换就直接得出需要的电压补偿量。

改进 $d-q$ 变换法检测原理框如图 2 所示。

图 2 改进 $d-q$ 变换法检测原理框图Fig.2 Principle diagram of improved $d-q$ transform detection method

在图 2 中, $u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ 表示系统侧三相电压; $u_a'(t), u_b'(t), u_c'(t)$ 表示三相目标电压函数; $u_a^c(t), u_b^c(t), u_c^c(t)$ 表示检测出的三相电压补偿量。

系统侧电压与目标电压函数分别进行 $d-q$ 变换时所用的变换矩阵相同,并不需要反复查表。

2 计算机仿真验证

本文基于 Matlab 6.5 平台利用改进的 $d-q$ 变换法对电压跌落、谐波、不对称及含有衰减直流分量的电压信号进行检测,并给出仿真结果。

在求取电压有效值时,低通滤波器的选择是实时性的关键^[9],文献[10]就低通滤波器的选择进行了分析,研究表明低通滤波器的截止频率、阶数、类型对检测电路的动态效果和检测精度有很大的影响。综合考虑检测精度和实时性的要求选用二阶的 butterworth LPF,截止频率选择 $f_c=30\text{ Hz}$ 。

设三相电压在 $0\sim 0.06\text{ s}$ 之间时电压正常,负载功率因数为 0.6 ,幅值为标准值。

以 a 相为例: $u_a(t)=220\sqrt{2}\sin(\omega t)(0\leq t\leq 0.06\text{ s})$,在 0.06 s 时电压跌落为 $150\sqrt{2}\text{ V}$,并伴随有谐波,衰减直流分量的产生及 30° 相位跳变。检测波形如图 3 所示。

由图 3(b)可知发生电压跌落扰动时刻(0.06 s)电压有效值的骤然下降。经过短暂的过渡,检测出电压有效值跌落为 150 V ,与设定的电压跌落相符。为正确判断跌落并兼顾补偿的快速性,仿真中设定电压下降到 200 V 为启动阈值,启动 DVR 进行补偿。从图 3(c)可见,在扰动发生后经过短暂过渡检测出相位跳变角为 $0.523=\pi/6$ 与设定的相位跳变角相符。

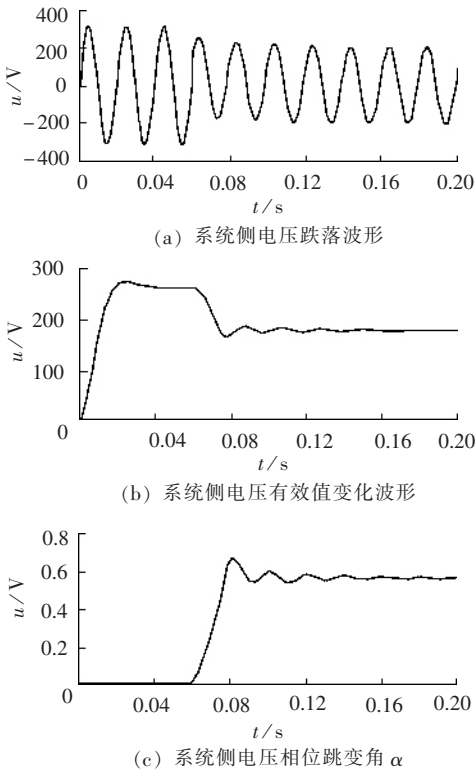


图 3 电压跌落并发生 30° 相位跳变
Fig.3 Voltage waveforms during voltage sag with 30° phase-angle jump

图 4 为按跌落前电压补偿的电压波形图。从图 4(b)可见:扰动发生后经短暂过渡(因为低通滤波器有延迟),敏感负荷处的电压幅值补偿为正常电压幅值,相位角与跌落前系统侧电压的相位角一致。

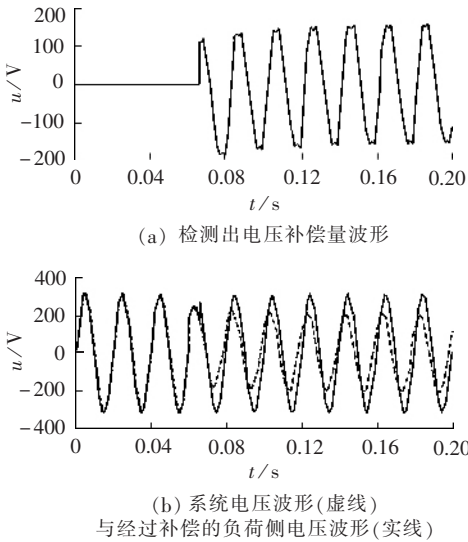


图 4 按跌落前电压补偿的仿真结果
Fig.4 Simulative results of compensation according to voltage before sag

图 5 是按照同相位补偿的电压波形,图 5(a)是目标电压函数相位跳变角,它与系统侧电压相位跳变角相等。从图 5(c)可见:经过短暂的过渡,经过补偿的负荷侧电压与扰动后系统侧电压的相位角一致,幅值达到标准电压值。

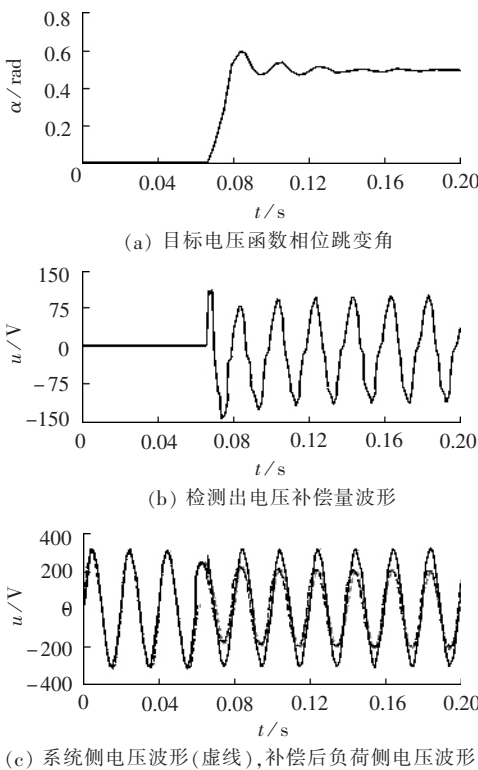


图 5 按同相位补偿的仿真结果
Fig.5 Simulative results of compensation according to phase-angle

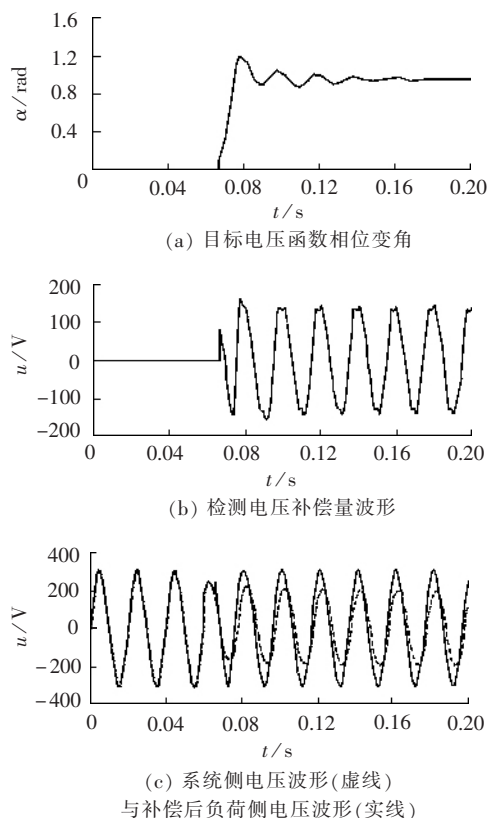


图 6 按最小能量补偿的仿真结果

Fig.6 Simulative results of compensation according to optimal energy

图 6(a)是检测出的最优角,本次仿真利用文献[11]最优角的计算公式计算。

$$\beta = \Phi + \alpha - \arccos \left[\frac{220 \cos \Phi}{\sqrt{(u_{\text{sag}} \cos \alpha)^2 + (u_{\text{sag}} \sin \alpha)^2}} \right]$$

式中 Φ 为负载的功率因数角, α 为电压相位跳变角; u_{sag} 为跌落电压的有效值。

本次仿真最优角的理论值为 0.956。从图中可以看出扰动后经过短暂的过渡,检测出了最优角。

由不同补偿策略所对应的电压补偿量波形图(图 4(a)、图 5(b)、图 6(b))可见;按照同相位补偿时电压补偿量幅值最小。

从不同补偿策略所对应的目标电压函数的相位角,图 4(a),图 5(a)(跌落前电压补偿时 $\beta=0$)可见;最小能量补偿时,目标电压函数的相位跳变角最大。由 3 个图补偿后的电压波形图(图 4(b)、图 5(c)、图 6(c))可见;根据不同的补偿策略,用改进 $d-q$ 变换法可快速准确的对电压扰动进行补偿。

3 结语

本文利用目标电压函数提出了新的改进 $d-q$ 变换法,可快速准确地求出电压跌落时刻、幅值和相位的跳变角。可根据不同的补偿策略,直接检测出 DVR 的补偿量。仿真结果表明,该方法具有实现简捷、动态特性好的优点,适合在工程中应用。

参考文献:

- [1] 李鹏,陈志业,尹华丽,等. 统一电能质量控制器及其控制信号检测方法的探讨[J]. 华北电力大学学报,2002,29(2):1-5.
LI Peng, CHEN Zhi-ye, YIN Hua-li, et al. Studies of unified power quality controller and controlling signal detecting method[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2002, 29(2): 1-5.
- [2] 罗世国,侯振程. 一种谐波及无功电流的自适应检测方法[J]. 电工技术学报,1993(3):42-46.
LUO Shi-guo, HOU Zhen-cheng. An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents[J]. *Trans. of China Electro Technical Society*, 1993(3): 42-46.
- [3] TUNABOYLUNS, COLLINS E R, CHANEY P R. Voltage disturbance evaluation using the missing voltage technique[C]// *Proceedings of the IEEE ICHQP VIII*. Athens Greece: IEEE, 1998: 577-582.
- [4] 肖湘宁,徐永海,刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1): 64-69.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Lian-guang. Research on mitigation methods of voltage sag with phase-angle jump[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(1): 64-69.
- [5] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. *IEEE Trans. on Industrial Application*, 1984, 20(3): 625-630.
- [6] 李庚银,陈志业,丁巧林,等. $dq0$ 坐标系下广义瞬时无功功率定义及补偿[J]. 中国电机工程学报,1996,16(3): 176-179.
LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, DING Qiao-lin, et al. Definition of generalized instantaneous reactive power in $dq0$ coordinates and its compensation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1996, 16(3): 176-179.
- [7] 赵剑锋. 基于电压型逆变器的可连续运行的动态电压恢复器的研究[D]. 南京:东南大学,2001.
ZHAO Jian-feng. Research on vsi-based uninterrupted dynamic voltage restorer[D]. Nanjing: Southeast University, 2001.
- [8] 马振国. 考虑暂态分量的动态电压恢复器的信号检测研究与实现[D]. 保定:华北电力大学,2004.
MA Zhen-guo. Research and realization of dynamic voltage restorer signal detection considering transient components[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2004.
- [9] 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,2004,24(11):193-198.
FENG Xiao-ming, YANG Ren-gang. A novel integrated morphology- dq transformation detection algorithm for dynamic voltage restorer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(11): 193-197.
- [10] 王群,姚为正,王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. 西安交通大学学报,1999,33(4):5-8,12.

WANG Qun,YAO Wei-zheng,WANG Zhao-an. Effect of low pass filter on harmonics detection circuit[J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**,1999,33(4):5-8,12.

[11] 袁川,杨洪耕. 动态电压恢复器的改进最小能量控制[J]. 电力系统自动化,2004,28(21):49-53.

YUAN Chuan,YANG Hong-geng. Advanced minimum-energy control of dynamic voltage restorer[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2004,28(21):49-53.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

张永平(1980-),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制,电力电子技术在电力系统中的应用(**E-mail**:zhangyongping558@sina.com);

李 鹏(1965-),男,河北保定人,副教授,博士,主要从事电能质量分析与控制、电力电子技术应用等方面的研究(**E-mail**:ncepulp@263.net)。

Compensation detection of dynamic voltage restorer
considering compensation strategies

ZHANG Yong-ping,LI Peng,LI He-ming

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: The detection of voltage compensation is the key factor influencing its real-time performance and compensation accuracy of DVR(Dynamic Voltage Restorer). An improved $d-q$ transform method is presented to further improve its compensation performance according to different compensation strategies of DVR by introducing the object voltage function. It real-timely detects the voltage sag duration,falling magnitude and phase-angle jump,considering decaying DC component,harmonics,unbalanced three-phase voltage and so on. Combined with compensation strategies,it detects the voltage compensation directly. Its validity and effectiveness in DVR are testified successfully by simulation analysis.

This project is supported by a Research Fund from State Power Corporation of China(SP11-2002-01-09) and Ph.D. Teacher Research Fund from North China Electric Power University(20041201).

Key words: dynamic voltage restorer; improved $d-q$ transform method; compensation strategy; voltage compensation; object voltage function

+++++