

单相 DVR 快速电压补偿控制的实现

周 晖, 齐智平, 何 飏, 韦统振

(中国科学院电工研究所, 北京市 100080)

摘要: 动态电压恢复器(DVR)是解决暂态电能质量问题的一种有效途径。就单相 DVR 的电压扰动检测、基于特定谐波消除的软件锁相技术,以及分段式电压补偿策略等问题进行了探讨。引入导数和积分方式来实现快速电压波形鉴别以及噪声消除,通过二次微分消除特定谐波分量,简化锁相滤波,推导了软件锁相初值角的计算方法,提出了分时段电压检测和补偿的模型,并配合实现补偿电压的生成,最后通过 DVR 样机的单相电压跌落实验验证了上述算法的可行性。

关键词: 动态电压恢复器; 波形辨识; 软件锁相环; 补偿策略; 坐标变换

中图分类号: TM761

0 引言

随着现代科学技术的发展,越来越多的工业生产过程采用了基于计算机和微处理器的敏感用电设备,即使几个周期的供电中断或电压暂降都将影响它们的正常工作。另一方面,大量非线性、冲击性负荷的增加,以及电网故障造成的电压暂升、暂降、不对称、闪变、谐波及瞬时断电等电能质量问题日益增多,严重影响了生产过程的正常运行,从而产生了巨大的经济损失。目前,在对电能质量问题的研究中,动态电压质量问题,特别是电压暂降和瞬时供电中断已被认为是影响许多用电设备正常、安全运行的最严重的电能质量问题。

针对这种状况,定制电力技术(CP—custom power)应运而生^[1],其核心是电力电子设备在电力系统中的应用。动态电压恢复器(DVR—dynamic voltage restorer)是 CP 家族中的重要成员,它能补偿电压的暂降、暂升、不对称、闪变、谐波等动态电压质量问题,良好的动态性能和容量上的相对优势使其成为治理动态电压问题最经济、有效的手段之一。国外对 DVR 的研究开展得较早,并已有系列产品投入市场。目前国内的研究尚处于软件仿真和试验样机的研制阶段,对 DVR 的结构、参数选择^[2-4]、检测^[5-9]、锁相^[10-11]、补偿控制策略^[12-15]等方面都进行了探索研究,但是在补偿的实时性等方面还与实际应用要求存在一定的差距。

本文就电力系统中常见的电压暂升、暂降、振荡、谐波等电压质量问题的快速检测方法,以及单相电压暂升、暂降的 DVR 补偿控制方法进行了理论

分析,提出了分时段检测控制方式,以满足对电压补偿实时性和补偿策略多样性的要求,并对所提出的算法的有效性和正确性进行了实验验证。

1 电压扰动快速检测

在 DVR 的补偿过程中,准确、实时地检测瞬时电压的状况,对电网电压的实时补偿具有非常重要的意义。电压暂降补偿是 DVR 的主要功能,其关键是要及时检测出暂降的起止时刻、幅值和可能随之出现的相角变化。常见的检测方法包括有效值法、峰值电压法、 dq 变换和小波变换等^[5-9],这些方法大部分基于频域分析,需要的采样数据量很大,从而无法保证检测的实时性,只有 dq 变换法^[5-8]是实时进行数据处理,因此在对实时性要求较高的 DVR 检测中,有着无可比拟的优势。

由于大部分的电压暂降为单相事件,因此对单相电压扰动的检测显得尤为重要。在单相系统中,为了应用 dq 变换,需要根据历史电压来构造虚拟三相系统。但当发生单相故障且持续时间超过 $1/6$ 周期时,用来构造虚拟电压的历史电压也是暂降后的电压,因此构造出的三相系统不再是单相故障,从而会给判断带来很大的误差。一些文献中提出的由单相构造虚拟三相系统的方法,当出现相位跳变等情况时同样存在问题。

鉴于 DVR 对补偿实时性的严格要求,以及单相电压检测中信息量偏少的特点,本文考虑从历史电压状况和电压波形特征等方面着手,快速判断电压扰动的类型,实现快速补偿。

假设扰动发生前单相电压为:

$$v_a = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad (1)$$

求导和积分之后分别为:

$$v_a' = \sqrt{2}\omega V \cos \omega t \quad (2)$$

$$\int v_a = -\frac{\sqrt{2}V}{\omega} \cos \omega t \tag{3}$$

对于上述常见的扰动类型,其扰动之后的单相电压可统一采用下式来描述:

$$v_a = \sqrt{2}V \sin \omega t + \sqrt{2} \sum V_n \sin(n\omega t + \theta_n) e^{a_n t} \tag{4}$$

求导和积分之后分别为:

$$v_a' = \sqrt{2}\omega V \cos \omega t + \sqrt{2} \sum [V_n n\omega \cdot \cos(n\omega t + \theta_n) e^{a_n t} + V_n a_n \sin(n\omega t + \theta_n) e^{a_n t}] \tag{5}$$

$$\int v_a = -\frac{\sqrt{2}V}{\omega} \cos \omega t + \sqrt{2} \sum \frac{V_n e^{a_n t}}{\alpha_n^2 + n^2 \omega^2} \cdot [\alpha_n \sin(n\omega t + \theta_n) - n\omega \cos(n\omega t + \theta_n)] \tag{6}$$

图 1 所示为几种常见的电能质量扰动及其求导和积分通过 MATLAB 仿真后的波形。

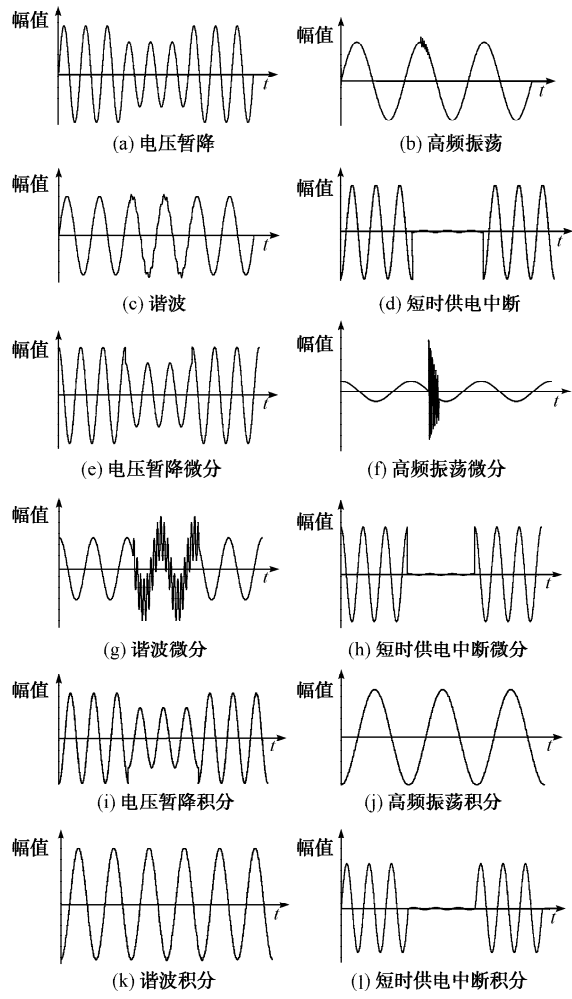


图 1 典型电能质量扰动及其微分、积分后的波形
Fig. 1 Typical disturbance with its differential coefficient and integration

可见在扰动发生后,这 3 个量都发生了跳变,且其变化趋势不尽相同:求导后高频分量被放大,可能

存在的直流分量消失;积分后高频分量的幅值受到很大程度的削弱,一部分噪声和采样误差被滤除。

表 1 所示为上述各种电压扰动以及导数、积分的变化趋势。在扰动初期,通过分析上述 3 个量的绝对值大小及其变化方式就可对系统电压状况做出判断,从而为是否进行电压补偿提供可靠的判断依据。具体操作流程为:首先根据采样数据计算相邻电压瞬时值之差;如果超出正常范围则根据连续 3 次的采样数据计算差分和累加,再根据预先设定的阈值来判断电压扰动的频繁和剧烈程度,通过连续 2 个~3 个采样点的比较,就可基本确定扰动的类型;然后根据 DVR 的补偿目标(例如只针对电压暂升和暂降进行补偿)来判断是否进行电压补偿。

表 1 不同电压扰动瞬时值、导数值、积分值的特征对比
Table 1 Comparison of voltage value, differential coefficient and integration

扰动类型	瞬时值特征	导数值特征	积分值特征
电压暂降/暂升	绝对值跳变,然后平稳变化	幅值变化范围较瞬时值增大	幅值变化范围较瞬时值减小
高频/低频振荡	绝对值频繁波动	绝对值频繁剧烈波动	与正常状况近似
脉冲暂态	绝对值短时频繁小幅波动	绝对值短时频繁剧烈波动	与正常状况近似
谐波	绝对值小幅波动	绝对值剧烈波动	与正常状况近似
短时供电中断	绝对值接近 0	接近 0	绝对值几乎为 0

为了实现快速检测,尽可能高的采样频率是必要条件,合理地选择和判别不同电压状况的阈值也尤为重要。采样频率的选择还要考虑系统的实时通信带宽和处理能力。由于测量误差、传输误差及其他噪声对采样数据的干扰,有可能造成误判,因此需要滤除,而通过上述的积分操作便可以实现。图 2 所示为含有噪声干扰的电压暂降信号在积分前后的波形,可见其滤波效果十分明显。

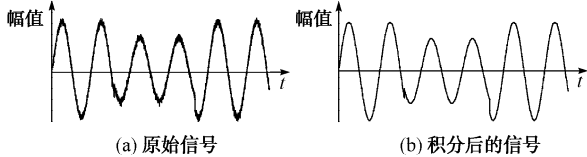


图 2 含有噪声的电压暂降信号积分前后波形比较
Fig. 2 Comparison of voltage value of the noised voltage dip before and after the integration

在算法的实时性上,由于只采用了一阶差分和累加,每次计算只需对连续的 2 个采样数据进行处理,因此计算量很小,在采样间隔内足够完成。在进行阈值对比时,通过查表方式实现,实际的计算开销很小。此外,为防止因相位跳变造成检测时的误判,需要实时根据锁相输出来更新相位值。

2 锁相技术

为了给其他环节提供电压实时信息的参考,获得电源侧电压的相位是首要的任务。获得相位信息的方法通常有过零比较、最小二乘法、软件锁相等多种方法^[10-11]。过零比较锁相方式一个工频周期只能比较 2 次,动态性能较差;最小二乘法动态响应速度快,但对谐波的抑制较差;软件锁相环(SPLL)基于瞬时无功理论,它将三相输入电压 u_a, u_b, u_c 经 dq 变换得到 u_q ,三相电压正常且锁相准确时 u_q 为 0,变换所使用的角度是锁相环的输出 θ^* ,整个流程构成一个负反馈,通过 PI 调节可达到锁相的目的,其控制流程图如图 3 所示。

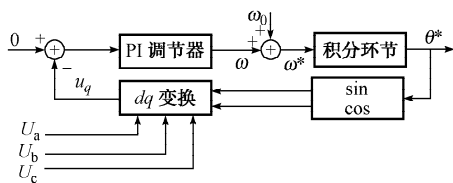


图 3 SPLL 的控制流程
Fig. 3 Control flow of SPLL

对本文考虑的单相电压扰动,为实现 SPLL 同样需要构造虚拟三相系统。借鉴文献[10]中的方法,但采用的 60° 之前的数据是根据正常电压值推算得到而非实测值,因而单相电压发生扰动后,无论幅值、相位是否变化,另外两相均为正常值。由于三相电压不平衡,转换得到的 q 轴分量中始终都含有与锁相输出 θ^* 无关的直流分量,无法用滤波的方式解决,在以往文献的 SPLL 算法中通常未对此问题进行考虑。为此,需要先对电压进行正负零序分解,然后将变换得到的正序电压作为 SPLL 的输入,这样准确锁相之后 q 轴分量为 0。

由于发生扰动时可能会伴随着谐波,经过 dq 变换后的 q 轴分量需要进行滤波。为简化滤波器的设计,提高系统的动态性能,可以采用先求导再积分的方式,滤除低次谐波。以 3 次谐波的消除为例,由于系统谐波大都为奇次谐波,因此 dq 变换后为偶次分量,而基波分量在未锁相时经 dq 变换后 q 轴存在直流分量。假设 dq 变换后的 q 轴分量为:

$$u_q = \sqrt{2} \sum_{n=0}^{\infty} U_n \sin(2n\omega t + \varphi) \quad (7)$$

求导得:

$$u_q' = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} 2n\omega U_n \cos(2n\omega t + \varphi) \quad (8)$$

求导的目的在于消除直流分量,然后对它进行 3 次积分得到:

$$\int u_q' dt = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(2n\omega t + \varphi) \quad (9)$$

$$\iint u_q' dt = -\sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n}{2n\omega} \cos(2n\omega t + \varphi) \quad (10)$$

$$\iiint u_q' dt = -\sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n}{4n^2\omega^2} \sin(2n\omega t + \varphi) \quad (11)$$

因此有 $u_{q2} + 4\omega^2 \iint u_q' dt = 0$,其中 u_{q2} 和 u_{q2}' 分别为 q 轴分量中的倍频分量及其微分值。采用这种方式能消除 q 轴电压中的 2 次分量,同时不影响直流分量的大小,并且对其他谐波分量会有很大程度的削减,更加有利于滤波器设计。再通过简单的低通滤波环节之后,进入 SPLL 的 q 轴分量就近似只含有直流分量了。

为了使锁相环尽快收敛,初值的选择十分重要。无论是否发生相位跳变,均可根据扰动前的锁相输出和由扰动后 SPLL 中 dq 轴分量的大小计算得到的角度值来确定相位初值。电压正常时锁相输出的角度与电网电压同相,变换后只有 d 轴分量,如图 4 中 U_s 所示。若发生了伴随相位跳变的电压扰动,则电压相量在 dq 轴上均有投影,如图 4 中 U, U_d 和 U_q 所示。

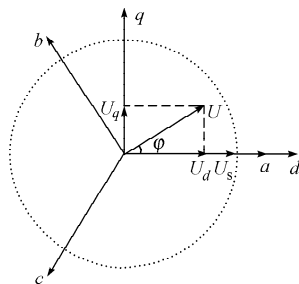


图 4 SPLL 相位修正示意图
Fig. 4 Modification of SPLL

相位跳变 φ 可以通过 U_q 和 U_d 来计算:

$$\varphi = \arctan \frac{U_q}{U_d} \quad (12)$$

以此来修正 SPLL 的相位输出后,相位值已近似为电压扰动后系统基波正序电压的相位值,从而能保证锁相环快速收敛。

在算法的实时性上,锁相过程中会用到 1 次差分 3 次累加。经过推算,最终需要计算下式:

$$u_q + 4\omega^2 \iint u_q' dt = u_q + K(u_{qn} + 2u_{qn-1} - 2u_{qn-3} - u_{qn-4}) \quad (13)$$

因为 ω 和 Δt 是确定的,每次计算只需在对采样数据进行正负零序变换和正序分量的 $dq0$ 变换之后,再进行简单的加减法运算,因此锁相的实时性可以满足。

3 电压补偿策略

传统的电压补偿控制策略主要包括暂降前电压补偿(完全补偿)、同相位电压补偿、电压相位超前补偿(最小能量补偿)等^[13-18]。为了实现补偿的快速性,结合前述的扰动快速检测算法,本文将检测和补偿控制分为 2 个时段分别实现。图 5 为 DVR 电压补偿的流程图。

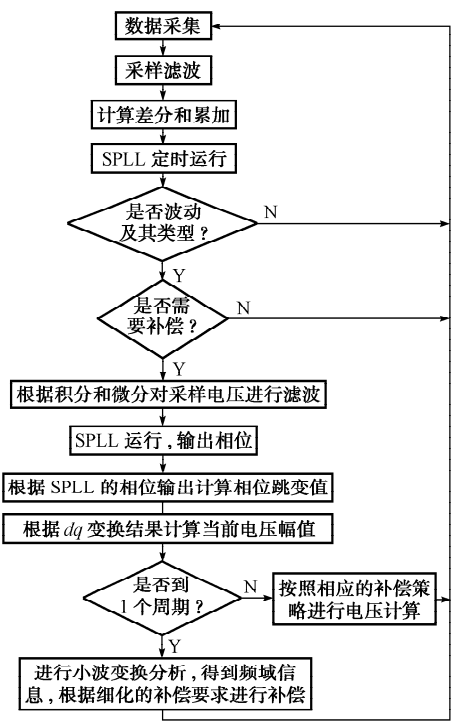


图 5 DVR 补偿流程
Fig. 5 Flow chart of DVR compensation

在扰动初期根据快速检测结果,判断是否需要补偿,如果需要则按照同相位电压补偿^[15]的要求进行;在补偿到一定时间后(例如 1 个周期),再采用傅里叶变换或小波分解等算法对第 1 阶段的采样数据进行处理,得到扰动的幅值、相位跳变及其频域信息,从而可以按照更细化的补偿要求(例如最小能量注入^[13-14]、完全补偿^[15]等)实现电压的补偿。

由于第 1 阶段中采用同相位电压补偿,因此无需通过正负零序变换和 dq 变换的方式来获得各序各次电压的补偿量,而可以直接根据锁相环输出的与系统电压正序基波分量同步的角度值,通过查表的方式构造目标电压值,然后与实际电压采样值相减即可得到所需的补偿电压值。相对于传统的基于坐标变换的电压补偿算法,省去了坐标变换和滤波环节,更加快速、简便。图 6 所示为按照同相位补偿要求计算补偿电压的过程,其中阴影部分为待补偿量。

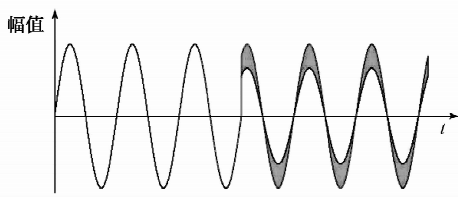


图 6 同相位补偿示意图
Fig. 6 Sketch map of in-phase compensation

4 单相 DVR 的实验结果

单相 DVR 的拓扑结构见图 7。整流部分从电网吸收能量给储能单元充电;电压扰动时,逆变环节根据补偿电压指令将能量从储能单元经过 LC 滤波器输送到负载端。模拟的单相电压跌落由单相电压跌落发生器实现,负载端为恒定阻抗的感性负载。

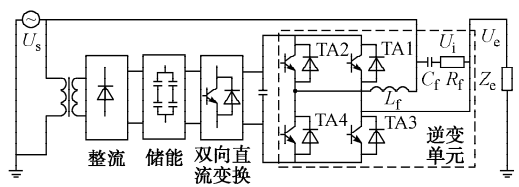


图 7 完全补偿示意图
Fig. 7 Sketch map of complete compensation

图 8 所示为示波器捕捉到的电源侧电压跌落波形和经补偿的负载端电压波形,分别为 75° 和 270° 相位偏移。由图可见,DVR 在电压跌落约 5 ms 时间内就实现了补偿,负载端电压也基本恢复到正常状况,即使在电压跌落幅值很大的情况下,DVR 也能在 10 ms 之内实现补偿。补偿开始和结束的过渡过程较短且比较平缓,整体补偿效果比较理想。

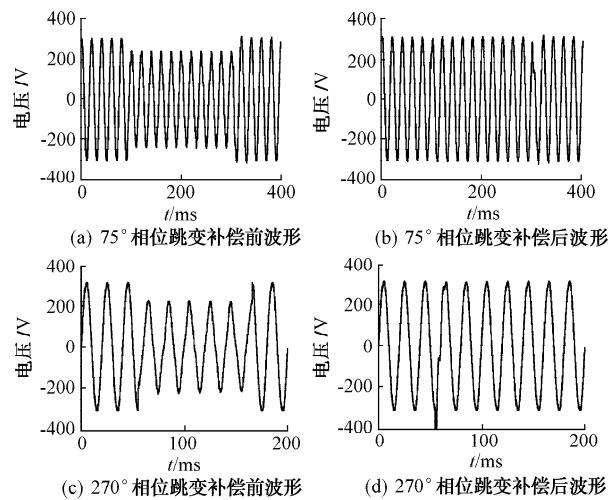


图 8 单相电压跌落的 DVR 补偿效果
Fig. 8 Compensation of single phase voltage dip

5 结语

本文通过对各种电能质量问题的波形进行分析,提出了综合采用瞬时值、导数和积分值实现快速电压扰动检测的新方法;在传统 SPLL 的基础上,采用先求导后积分的方式,滤除特定谐波,大幅削减了高次谐波,简化了滤波环节的设计;通过计算初始相角修正量来加速 SPLL 的收敛性;最后提出了分时段的检测和补偿控制方案,以实现快速、准确的电压补偿。经过理论分析,算法的实时性可以满足;通过硬件电路的单相电压跌落补偿实验,验证了算法对单相电压跌落补偿的实用性。

参考文献

- [1] 吴彤,涂光瑜,杨小卫.采用定制电力技术解决配电侧电能质量问题.高电压技术,2005,31(9):72-74.
WU Tong, TU Guangyu, YANG Xiaowei. Research of custom power technology applied for improving the power quality. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 72-74.
- [2] 杨溯,韩英铎,马维新.单相串联电压质量补偿器控制器的研究.电力系统自动化,2002,26(15):45-48.
YANG Chao, HAN Yingduo, MA Weixin. Control method of single phase series voltage quality compensator. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 45-48.
- [3] 林智声,戴宁怡,黄民聪,等. DVR 的不平衡浪涌和过电压控制.电力系统自动化,2005,29(20):35-39.
LAM C S, DAI Ningyi, WONG M C, et al. Unbalanced voltage swell and over-voltage control in dynamic voltage restorer. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 35-39.
- [4] 蒋平,赵剑锋,唐国庆,等.串联型电能质量补偿器的研究.电网技术,2001,25(10):54-57.
JIANG Ping, ZHAO Jianfeng, TANG Guoqing, et al. Study on series power quality compensator. Power System Technology, 2001, 25(10): 54-57.
- [5] 徐永海,肖湘宁,杨以涵,等.基于 dq 变换和 ANN 的电能质量扰动辨识.电力系统自动化,2001,14(1):24-27.
XU Yonghai, XIAO Xiangning, YANG Yihan, et al. Power quality disturbance identification using dq conversion-based neural classifier. Automation of Electric Power Systems, 2001, 14(1): 24-27.
- [6] 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.中国电机工程学报,2004,28(6):193-198.
FENG Xiaoming, YANG Rengang. A novel integrated morphology—— dq transformation detection algorithm for dynamic voltage restorer. Proceedings of the CSEE, 2004, 28(6): 193-198.
- [7] 赵国亮,刘宝志,肖湘宁,等.一种无时延的改进 dq 变换在动态电压扰动识别中的应用.电网技术,2004,28(7):53-57.
ZHAO Guoliang, LIU Baozhi, XIAO Xiangning, et al. Application of improved dq transform without time delay in dynamic voltage disturbance identification. Power System Technology, 2004, 28(7): 53-57.
- [8] 杨亚飞,颜湘武,娄尧林,等.一种新的电压骤降特征量检测方法.电力系统自动化,2004,28(2):41-44.

- YANG Yafei, YAN Xiangwu, LOU Yaolin, et al. A new method to detect voltage sag characteristics. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 41-44.
- [9] 肖湘宁,徐永海,刘昊.电压凹陷特征量检测算法研究.电力自动化设备,2002,22(1):19-22.
XIAO Xiangning, XU Yonghai, LIU Hao. Research on the detection method of voltage sag characteristics. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 19-22.
- [10] 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.电网技术,2004,28(8):42-45.
LI Yandong, WANG Kaifei, ZHUO Fang, et al. Application of soft phase locked loop technique in dynamic voltage restorer. Power System Technology, 2004, 28(8): 42-45.
- [11] 李彦栋,王凯斐,卓放,等.动态电压恢复器锁相技术和控制策略的研究.电力电子技术,2004,38(2):24-26.
LI Yandong, WANG Kaifei, ZHUO Fang, et al. Study of phase locked technique and control strategies of dynamic voltage restorer. Power Electronics, 2004, 38(2): 24-26.
- [12] 谢旭,胡明亮,梁旭,等.动态电压恢复器的补偿特性与控制目标.电力系统自动化,2002,26(8):41-44.
XIE Xu, HU Mingliang, LIANG Xu, et al. Compensation range and control object of dynamic voltage restorer. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 41-44.
- [13] 袁川,杨洪耕.动态电压恢复器的改进最小能量控制.电力系统自动化,2004,28(21):49-53.
YUAN Chuan, YANG Honggeng. Advanced minimum-energy control of dynamic voltage restorer. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 49-53.
- [14] 袁川,杨洪耕.动态电压恢复器的最小视在功率控制.电力系统自动化,2005,29(11):19-22.
YUAN Chuan, YANG Honggeng. Minimum apparent power control of dynamic voltage restorer. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 19-22.
- [15] 冯小明,杨仁刚.动态电压恢复器电压补偿策略的研究.电力系统自动化,2004,28(6):68-72.
FENG Xiaoming, YANG Rengang. Analysis of voltage compensation strategies for dynamic voltage restorer(DVR). Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 68-72.
- [16] CHOI S S, LI B H, VILATHGAMUWA D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 51-57.
- [17] LI B H, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. A new control strategy for energy-saving dynamic voltage restoration// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 2, Jul 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2000: 1103-1108.
- [18] ETXEBERRIA-OTADUI I, VISCARRET U, BACHA S, et al. Evaluation of different strategies for series voltage sag compensation// Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference: Vol 4, Jun 23-27, 2002, Cairns, Australia. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2002: 1797-1802.

周 晖(1979—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统电能质量的调节。E-mail: zhouh@iee.ac.cn

(下转第 98 页 continued on page 98)

(上接第 65 页 continued from page 65)

齐智平(1958—),女,研究员,博士生导师,主要研究方向为储能、节能技术在电网及分布式发电系统中的应用。

何 飏(1969—),男,助理研究员,主要研究方向为电力电子与变频技术以及电力系统电能质量问题的解决。

Fast Voltage Compensation for a Single Phase Dynamic Voltage Restorer

ZHOU Hui, QI Zhiping, HE Biao, WEI Tongzhen

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Dynamic voltage restorer (DVR) is an effective solution for transient power quality problems. The issues for voltage disturbance detection, selective harmonic elimination based on software phase locking technique and two step voltage compensation algorithm are discussed. The differential and integration strategies are introduced for fast voltage waveform identification and filtering. Second differential is used in eliminating selective harmonics to simplify phase lock filtering. The calculation of initial angle for software phase lock loop (SPLL) is deduced. A model for two step voltage detection and compensation is presented to coordinate the calculations of voltage compensation. The single phase voltage dip tests in a DVR prototype verify the feasibility of the proposed algorithm.

This work is supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA516020).

Key words: dynamic voltage restorer; waveform identification; software phase lock loop; compensation strategy; coordinate conversion