

# 一种新型低压电网动态电压恢复器的仿真分析

吴志坚<sup>1</sup>,徐星星<sup>2</sup>,王宝安<sup>2</sup>

(1.扬州供电公司,江苏扬州 225009;2.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

**摘要:**动态电压恢复器(DVR)具有良好的动态性能,对电网电压波动有着很好的调节作用。提出了一种用于低压电网的新型动态电压恢复器,详细介绍了该DVR的工作原理,包括其主电路结构、检测算法和控制策略。并在仿真软件PSIM中建立了该DVR的详细模型,对电压波动情况下的DVR电压补偿过程进行仿真。仿真结果表明,该新型DVR具有较理想的动态特性和补偿效果。

**关键词:**动态电压恢复器;dq检测算法;无差拍控制

**中图分类号:**TM761

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2012)03-0039-04

随着现代工业的不断发展,基于计算机和微处理器的敏感负荷越来越多,对电压质量的要求都较高,即使几个周期的供电中断或电压暂降都将影响其正常工作。另一方面,非线性、冲击性负荷的大量增加,以及电网故障造成的电压暂降、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,造成巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。动态电压恢复器(DVR)能补偿电压的暂降、暂升等动态电压质量问题,被认为是当前治理动态电压问题最经济、最有效的装置。我国低压电网都采用三相四线制结构,三相电压不平衡情况较多,针对这种现状,文中提出一种用于低压电网的通过功率单元串联输出补偿电压、采用三单相结构的新DVR。

## 1 DVR的基本工作原理

DVR的主要功能是为敏感负荷提供稳定的交流电压,使敏感负荷不受电压暂降、瞬时中断、谐波等电能质量问题的影响。DVR串联在电源与敏感负荷之间,当负荷正常运行时DVR被旁路,由电网提供电压;当电网电压发生电压问题时,DVR可以在毫秒级内向线路中注入一个幅值、相位可控的串联补偿电压,以确保敏感负荷输入电压的恒定。

常见的DVR主要由电压型逆变器、控制单元、储能单元、输出滤波单元和串联变压器组成,其典型主电路结构如图1所示。当DVR工作时,必然会与系统之间进行能量交换,储能装置就是给DVR提供能量的部分,通常有2种结构:直接采用储能单元的储能元件和采用整流方式。直接采用储能元件有电容储能、蓄电池储能、超导储能等,这种方式只能在一段时间内对电能质量进行补偿;而采用整流方式的DVR可以一直不间断的对电源电压进行补偿,缺点是会给电网带来一定的谐波污染。

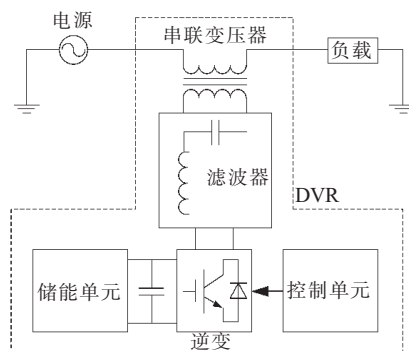


图1 单向DVR的结构

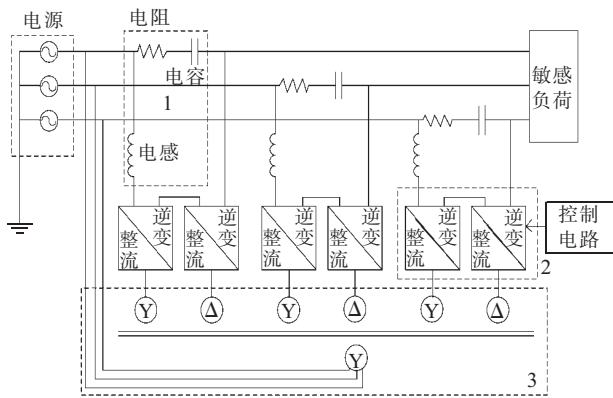
控制单元利用传感器、检测系统检测出电网电压,经过对采集到的数据分析、判断,利用控制环节产生逆变器中功率开关器件所需的脉宽调制PWM信号,再由驱动电路控制逆变器中功率开关器件的导通。逆变器主要产生系统所需的补偿电压,补偿电压经过输出滤波单元滤除高次谐波电压后,再由串联变压器或直接通过滤波单元电容注入电网,最终产生的补偿电压将抵消电网侧电压波动,确保负载侧输入电压的稳定,提高系统的电能质量。

## 2 新型DVR的工作原理

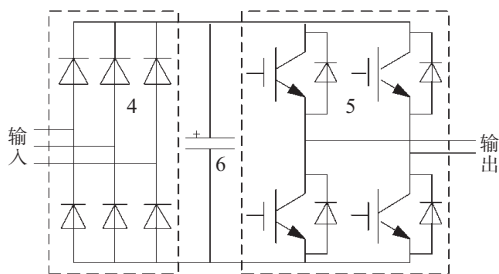
### 2.1 主电路结构

DVR从补偿方式上看可分为2类:基于线电压补偿且各相相互关联的线电压补偿型DVR和基于相电压补偿且各相相互独立的相电压补偿型DVR。DVR从逆变器拓扑的结构上来看主要有:三相桥结构、三相四线结构和三单相结构。针对我国低压电网现状,用于低压电网的DVR通常采用补偿电容器与系统串联的方式,这种方式也更符合工程的实际应用。文中提出一种新型的用于低压电网的三单相结构的相电压补偿型DVR,其主电路如图2所示。

该新型DVR采用三单相结构,分别对每相电压进行补偿,主要包括LC滤波器、功率单元模块、控制电路和移相变压器4个组成部分。首先检测出电



(a) DVR 的主电路结构



(b) 功率单元电路结构

1 为 LC 滤波器;2 为功率单元模块;3 为移相变压器;4 为二极管三相整流电路;5 为 IGBT 构成的三相逆变电路;6 为电解电容

图 2 新型 DVR 主电路结构

网电压信号,然后通过控制电路得到各个功率单元逆变电路的开关器件绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的脉宽调制(PWM)驱动信号,控制 IGBT 的导通,使功率单元模块输出所需要的补偿电压,并经 LC 滤波器滤除高次谐波电压后与电源电压串联,从而保证敏感负荷输入电压的稳定。

DVR 与系统的耦合方式有 2 种,即串联变压器耦合和电容耦合。耦合变压器可以降低 DVR 电压等级,隔离系统与 DVR 装置,但是变压器的存在会增加逆变器的容量,也可能给控制的精度和稳定性带来负面的影响。因此,在电压等级较低的应用中可以考虑省去串联变压器。文中的 DVR 采用电容耦合方式,用工频变压器隔离直流侧和电网。

每个功率单元模块由 2 个功率单元逆变电路输出串联而成,每个功率单元由 6 个二极管组成的三相整流电路通过电解电容连接到 4 个 IGBT 和 4 个二极管组成的单相逆变电路构成。该模块中的 2 个逆变电路开关器件 IGBT 的驱动信号错开一定角度,使逆变输出电压波形毛刺减少,从而降低 LC 滤波器中电感的要求。此外,2 个功率单元的串联省去了传统方式中的串联变压器,降低了装置成本,可靠性相对较高,不存在传统器件串联引起的均压问题。

6 个功率单元分别由移相变压器的 6 个二次侧绕组供电。移相变压器有 1 个一次侧星形绕组和 6

个二次侧绕组,其二次侧绕组中 3 个为星形联结,其他 3 个为三角形联结,每个二次侧绕组分别移相一定的角度给 6 个功率单元的 6 脉波二极管整流供电。移相变压器的采用实现了其一次侧、二次侧线电压的相位偏移,使得由于整流而产生的谐波折算到移相变压器一次侧时相互抵消,从而消除整流产生的谐波对电网的影响。此外,移相变压器不仅实现功率单元与电源间的电气隔离,还使每组功率单元的主回路相对独立,彼此间相互绝缘,互不影响。当某个功率单元出现故障时,可自动退出系统,而其余的功率单元可继续保持运行,减小停机时造成的损失。

## 2.2 DVR 的检测算法

电压幅值和相位实时、准确的检测是 DVR 的关键。常见的检测算法主要有:有效值法、峰值电压法、 $dq$  变换和小波变换等<sup>[2]</sup>。这些检测算法大多基于频域分析,只有  $dq$  变换法实时性较高,其余算法需要的采样数据量很大,实时性较差。因此在对实时性要求较高的 DVR 检测中通常都采用  $dq$  变换。

传统的  $dq$  变换以三相对称系统为基础,能实时、快速、准确地检测出三相对称系统的电压跌落。而低压电网中电压跌落多为单相事件,三相不对称居多,此时负序分量较大,传统的  $dq$  变换不能准确提取出电压基波正序分量,检测精度受到影响。因此,文中采用改进的  $dq$  检测算法(如图 3 所示),用于提取三相不对称系统的电压基波正序分量,滤除负序分量转化带来的二次谐波<sup>[3]</sup>,同时消除低通滤波器带来的延时,提高 DVR 检测的实时性。

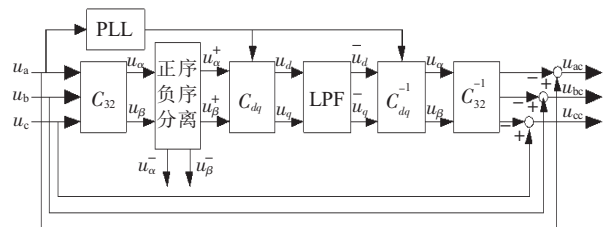


图 3 改进的三相 DVR 检测方法

这种改进的  $dq$  检测算法实质是:(1) 先将三相电网电压由三相静止坐标系变换到两相静止  $\alpha\beta$  坐标系,如式(1)所示;(2) 通过最小二乘法建立方程分离出  $u_{\alpha}, u_{\beta}$  的正序分量,接着将分离出的正序分量  $u_{\alpha}^+, u_{\beta}^+$  进行  $dq$  变换,如式(2)所示;(3) 使用低通滤波器滤除其他频次的分量,得到由基波正序分量转换后的直流分量;(4) 将得到的直流分量进行  $dq$  变换和  $\alpha\beta$  变换的逆变换即可得系统基波正序分量。

$$u_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = C_{dq} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}, C_{dq} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\theta$ 为 $d$ 轴与 $\alpha$ 轴之间的夹角。计算出的基波正序分量的有效值和相位分别为:

$$\begin{cases} U = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \\ \Phi = \arctan \frac{U_q}{U_d} \end{cases} \quad (3)$$

改进的三相 DVR 检测方法,在确保检测精度的情况下,减少了计算量,有效地提高了 $dq$ 变换在三相不对称情况下的实时性。

### 2.3 无差拍控制策略

随着高性能数字信号处理器(DSP)的出现,一些先进的控制策略随之产生:如空间矢量控制、滞环比较控制、无差拍控制、模糊控制、重复控制、神经网络控制等等<sup>[4]</sup>。文中采用无差拍控制策略,该控制策略是在滞环比较控制技术的基础上发展起来的一种全数字化控制技术,至今已发展成一种较为理想的输出电压瞬时值控制技术。

该新型 DVR 逆变器的无差拍算法流程如图 4 所示,其中: $u_{caf}$ 为输出电容电压; $i_{La}$ 为负载电流; $u_{ref}$ 为输出电压参考值。

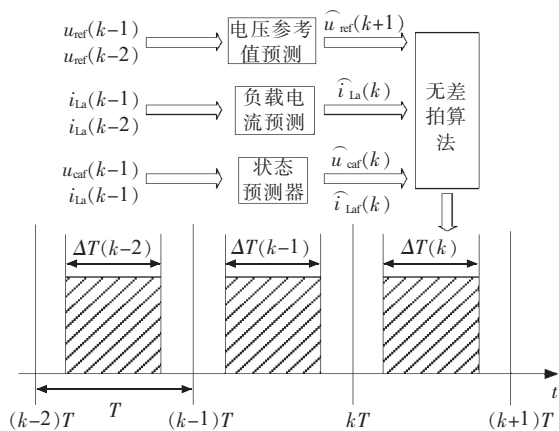


图 4 无差拍算法流程

无差拍控制策略的本质是由 DVR 逆变系统(包含滤波器)的状态方程和输出反馈信号推算出下一个开关周期的脉冲宽度<sup>[4]</sup>。这样就能确保各个采样时刻输出的电压值与给定的参考值精确相等,任何由负载引起的输出与给定的偏差,都能在 1 个开关周期内得到校正。无差拍控制具有消除稳态误差、快的暂态响应以及控制精度高等优点。

## 3 仿真分析

为了验证新型 DVR 的性能,特对其进行了仿

真分析,其主电路如图 2 所示。先将系统参数作如下设计:输入相电压额定有效值  $U=220\text{ V}$ ,电网基波频率  $f=50\text{ Hz}$ ,逆变器 IGBT 开关频率为  $10\text{ kHz}$ 。在时间  $t=0.5\sim 0.6\text{ s}$  之间注入 30% 的 5 次谐波和 30% 的电压骤降,DVR 的运行结果如图(5—8)所示。

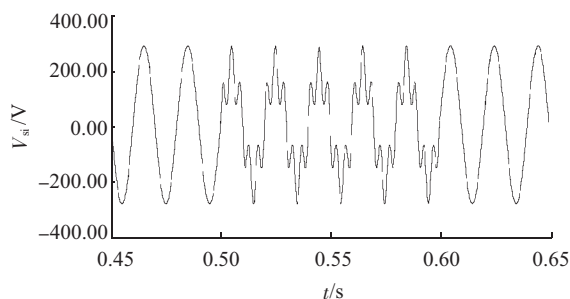


图 5 a 相电网电压  $V_{si}$  波形

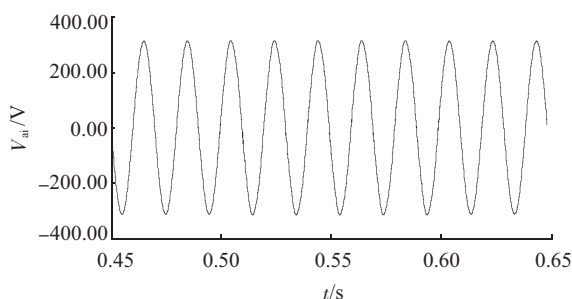


图 6 a 相负载电压  $V_{ia}$  波形

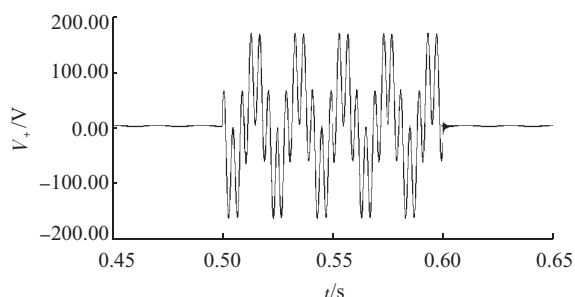


图 7 a 相补偿电压  $V_s$  波形

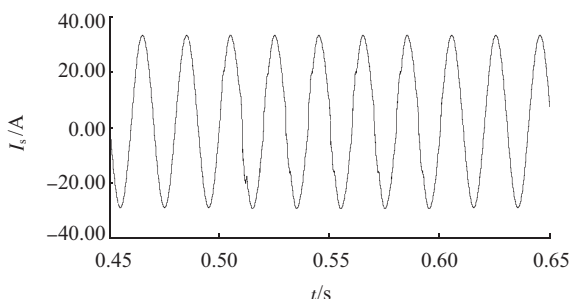


图 8 a 相电网电流  $I_s$  波形

可见,该新型 DVR 具有良好的补偿特性;在 DVR 工作期间,即  $0.5\sim 0.6\text{ s}$  之间,电网侧电流波形接近正弦,表明 DVR 的功率单元模块中的整流并未对系统电网造成谐波污染。

## 4 结束语

文中提出一种新型的用于低压电网电压稳定的实时 DVR,其采用三单相结构、一种改进的 $dq$ 检测

算法和无差拍控制策略,通过移相变压器从电网获得DVR的能量,再通过功率单元的串联输出所需要的补偿电压。在三相平衡和不平衡时都能对系统电压进行很好的补偿,且消除了DVR中的储能元件整流方式引入的谐波影响,同时降低了对LC滤波器中电感的要求,具有较高的实时性和可靠性、良好的动态性能和补偿效果等优点。这种新型DVR控制简单,易于实现,其缺点是采用了较多的功率开关器件和较贵的移相变压器,成本较高。

#### 参考文献:

- [1] 周静,韦统振,赵艳雷,等.低压配电网中单相动态电压恢复器与电力系统之间的能量流动[J].电力自动化设备,2010,30(4):26-30.
- [2] 张国荣,丁明,梁海涛,等.一种应用于单相DVR的检测算法与仿真[J].系统仿真学报,2007,19(4):732-734.
- [3] 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.
- [4] 马振国,李鹏,赵保利,等.DVR电压波形跟踪无差拍控制方法[J].电力自动化设备,2005,25(3):13-17.

#### 作者简介:

- 吴志坚(1979),男,江苏扬州人,工程师,从事电力系统运行管理工作;
- 徐星星(1987),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为电能质量;
- 王宝安(1978),男,江苏扬州人,讲师,从事电能质量方面的研究工作。

## Simulation and Analysis of A New Type DVR for Distribution Network

WU Zhi-jian<sup>1</sup>, XU Xing-xing<sup>2</sup>, WANG Bao-an<sup>2</sup>

(1. Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225009, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Dynamic voltage restorer (DVR) has good dynamic performance and well regulating function for grid voltage fluctuation. A new type DVR for distribution network is proposed in the paper. And the principle of the new DVR is introduced in detail, including its main circuit structure, detection algorithm and control strategy. Besides, the detailed DVR model is established in PSIM, and simulations of DVR voltage compensation with grid voltage fluctuation are carried on. Simulation results show that the new type DVR has ideal dynamic characteristic and compensation effect.

**Key words:** dynamic voltage restorer (DVR); dq detection algorithm; dead beast control

(上接第38页)

- [2] 李元诚,方廷健,于尔铿.短期负荷预测的支持向量机方法研究[J].中国电机工程学报,2003,23(6):55-59.
- [3] 谢宏,魏江平,刘鹤立.短期负荷预测中支持向量机模型的参数选取和优化方法[J].中国电机工程学报,2006,26(22):17-22.
- [4] 姜惠兰,刘晓津,关颖,等.基于硬C均值聚类算法和支持向量机的电力系统短期负荷预测[J].电网技术,2006,30(8):81-85.
- [5] 牛东晓,贾建荣.改进GM(1,1)模型在电力负荷预测中的应用[J].电力科学与工程,2008,24(4):28-30.
- [6] 康重庆,夏青,沈瑜,等.电力系统负荷预测的综合模型[J].清华大学学报:自然科学版,1999,39(1):8-11.

#### 作者简介:

- 崔晓祥(1979),男,江苏兴化人,工程师,从事电力系统运行、检修工作;
- 李娟(1977),女,甘肃兰州人,工程师,从事电力系统运行、研发工作。

## Load Modeling Based on SVM in Power System

CUI Xiao-xiang<sup>1</sup>, LI Juan<sup>2</sup>

(1. Maintenance Branch of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211102, China;

2. Shanghai Schneider Electric Technology Co.Ltd., Shanghai 201200, China)

**Abstract:** Currently, the support vector machine (SVM) is used widely for its good theoretical background and optimizing characteristic based on structural risk minimization principle. For the deficiency of current load modeling, a non-mechanism load modeling method based on SVM regression is put forward and the specific steps of load modeling are also provided. Compared with the modeling results of the same line load using artificial neural network (ANN), the load modeling results using SVM regression is better. Thus, the feasibility of the proposed load modeling method based on SVM is proven, which is also the new idea and method for load modeling in power system.

**Key words:** power system; load modeling; support vector machine (SVM) regression; active load; reactive load