

动态电压恢复器单周控制策略的建模与仿真研究

李 承, 邹云屏, 范 婕

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 单周控制技术具有控制精度高、动态跟踪性佳、控制鲁棒性好等特点, 把单周控制技术应用于动态电压恢复器(DVR)控制中, 提出了一种针对单相动态电压恢复器的单周控制方法, 给出了单周控制单相 DVR 的原理图, 建立了相应的 DVR 单周控制模型。在理论分析的基础上对电容性负载、电感性负载 2 种情况进行了仿真研究。理论及仿真研究均表明: 单周控制技术对于 DVR 有理想的控制效果。

关键词: 动态电压恢复器; 单周控制; 控制模型

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0007-04

0 引言

动态电压恢复器 DVR(Dynamic Voltage Restorer)对于改善电网的电压质量有很好的作用^[1-10], 其可以动态地跟踪电网电压的变化, 进行实时电压调节和补偿。单周控制技术具有控制精度高、动态跟踪性好、控制鲁棒性好等特点^[11-13]。本文成功地把单周控制技术应用于 DVR 控制中。通过理论分析得到了一种 DVR 的单周控制模型, 并进行了仿真研究。理论分析与仿真研究均表明, 单周控制用于 DVR 的控制模型简单、控制精度高、动态特性好。

1 电路结构与单周控制模型

单周控制单相 DVR 原理图如图 1 所示。

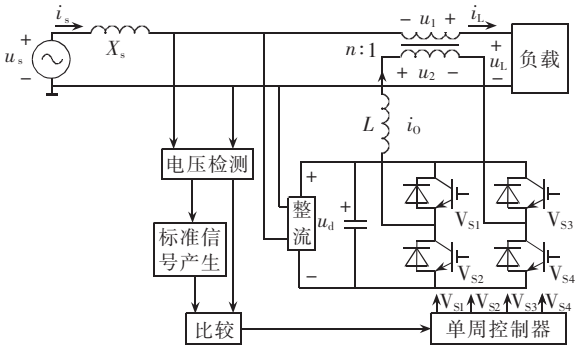


图 1 单相单周控制 DVR 原理图

Fig.1 One-cycle control single-phase DVR

电路由电网供电主电路、DVR 主电路、DVR 的检测与控制电路 3 部分组成。DVR 由直流电源、逆变桥和变压器构成。

电源向负载供电时, 经过变压器的初级串接到负载上, 负载两端的电压等于电源电压与变压器初级绕组两端电压之和, 即 $u_L = u_s + u_1$ 。在 DVR 工作

时,可通过调整变压器电压 u_1 ,实现动态地调节负载两端电压 u_L ,使其始终保持在接近额定电压的等级上。

DVR 的动态特性应满足快速调节电压的变化能力。当电源电压发生突变时,DVR 可以快速地进行调节,从而保证负载端电压基本稳定。

由图 1 可知,DVR 的控制部分包括电压检测,标准正弦信号生成、比较和单周控制器。检测部分完成对电源电压的检测,其输出一方面用于生成同步标准正弦信号,另一方面作为比较信号,标准信号产生模块用以产生与电源电压同步的标准正弦信号,该信号作为比较时的标准信号。控制器采用单周控制,把单周控制用于 DVR 可以充分利用单周控制的快速动态跟踪特性,实现快速的动态调节效果。

从图 1 可以得到:

$$u_1 = u_L - u_s \quad (1)$$

根据变压器的电压变换关系有

$$u_1 = k u_2 \quad (2)$$

式中 k 为变压器的变比。

根据单周控制原理^[11-13],在 1 个时钟控制周期 T_s 内,变换器直流侧电容电压 u_d 的平均值与变压器次级电压 u_2 的平均值之间应该有如下关系:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} u_d dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_2 dt \quad (3)$$

上式中开关占空比 D 与 T_s 乘积表示开关在 1 个时钟周期内的开通时间。因为 1 个时钟周期非常短,所以在 1 个时钟周期内可以把电压 u_d , u_2 均看作常数,可以把它们提到积分号以外。因此,从式(3)可以得到:

$$u_d D = u_2 \quad (4)$$

把式(1)(2)代入式(4)可得:

$$u_d D = \frac{1}{k} (u_L - u_s) \quad (5)$$

将式(5)两边同乘以常数 k_1 ,有

$$k_1 u_d D = \frac{k_1}{k} u_L - \frac{k_1}{k} u_s \quad (6)$$

令

$$u'_d = k_1 u_d, \quad u_r = \frac{k_1}{k} u_L, \quad u'_s = \frac{k_1}{k} u_s \quad (7)$$

则式(6)又可以写为

$$u'_d D = u_r - u'_s \quad (8)$$

式(8)就是单相 DVR 的单周控制模型。对于 DVR,其控制目标就是使负载端电压 u_L 保持不变,也就是在式(5)中,电压 u_L 的有效值为常数。因而,在 k, k_1 为常数时,式(8)中电压 u_r 的有效值也保持不变,或者说 u_r 为幅值不变并与电源电压同步的正弦量。而幅度不变且与电源电压同步的正弦量可以看作标准正弦信号。因此,式(8)中电压 u_r 可以当作标准信号。而电压 u'_s 为与电源电压成比例

的正弦电压信号。电压 u'_d 是对变换器直流侧电容电压的取样信号。

根据单周控制原理可以知道,式(8)所描述的 DVR 的控制关系,就是对电容电压采样值积分,并把积分结果与标准正弦信号与电源电压信号的差值比较,以决定控制脉宽。

另一方面,从直观上的理解来看,决定脉冲宽度的因素也应该如此。因为,标准信号与电源电压信号的差值反映了电源电压对于所要求的额定电压的偏离情况,它当然应该对脉宽产生影响,故把它作为控制参考信号是合适的;而变换器直流侧电容电压的取样值 u_r ,也会随电源电压 u_s 的偏移而发生变化。所以,也应该对脉宽的调制产生影响,因此式(8)中把因交流电源电压变化而引起直流电压变化的影响也作为控制因素之一。式(8)所描述的 DVR 的单周控制模型本身包含了所有影响脉宽的因素。

根据式(8)可以得到单相 DVR 单周控制器模型原理图,如图 2 所示。

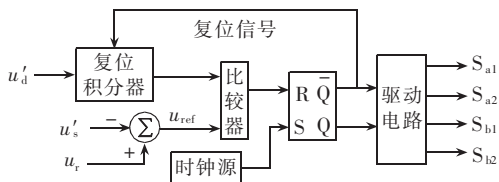


图 2 单相 DVR 单周控制电路

Fig.2 One-cycle control circuit of single-phase DVR

图 2 中, u'_d 为直流电压,用作积分器的积分输入信号; u'_s 为电源电压检测信号,与电源电压成比例; u_r 为标准正弦信号,它与正弦电源电压信号同步,并且有恒定的幅值。

控制器的工作原理为:检测电路检测电源电压 u_s 并经过处理后得到相应的检测值 u'_s ,同时,由标准正弦信号生成电路生成与电源电压同频率、同相位、等幅值的标准正弦信号 u_r 。把检测到的电源电压信号 u'_s 与标准正弦信号 u_r 相减可得到差值 u_{ref} ,用 u_{ref} 作为单周控制器的控制参考信号,与积分器积分输出进行比较,以决定输出的电平。根据单周控制原理可知,在积分器参数确定时,控制参考信号决定了控制器输出的控制脉冲宽度,也就决定了开关的开通时间,进而决定了输出电压的大小。由于单周控制器本身可以把控制误差控制在每一个时钟周期内,不会在各周期之间产生误差积累,同时,又由于单周控制器可以使输出与控制参考信号严格成比例。因此,采用单周控制的 DVR 有非常好的动态特性和跟踪效果。

2 仿真分析

为验证理论分析的正确性,对单相 DVR 作了仿

真分析。仿真分为电容性负载和电感性负载 2 种情况完成。采用 Matlab 中 Simulink 和 Simpowersystems 完成。仿真电路如图 3 所示(接电感性负载情况)。

当接电感性负载时,电感性负载为电阻 30Ω 与

电感 100 mH 串联。图 4,5 为接电感性负载时电源电压突降和突升时仿真波形。当接电容性负载时,负载电容为 $C=100\text{ }\mu\text{F}$ 与电阻 50Ω 并联,容性负载下电压突降和突升的波形如图 6,7 所示。

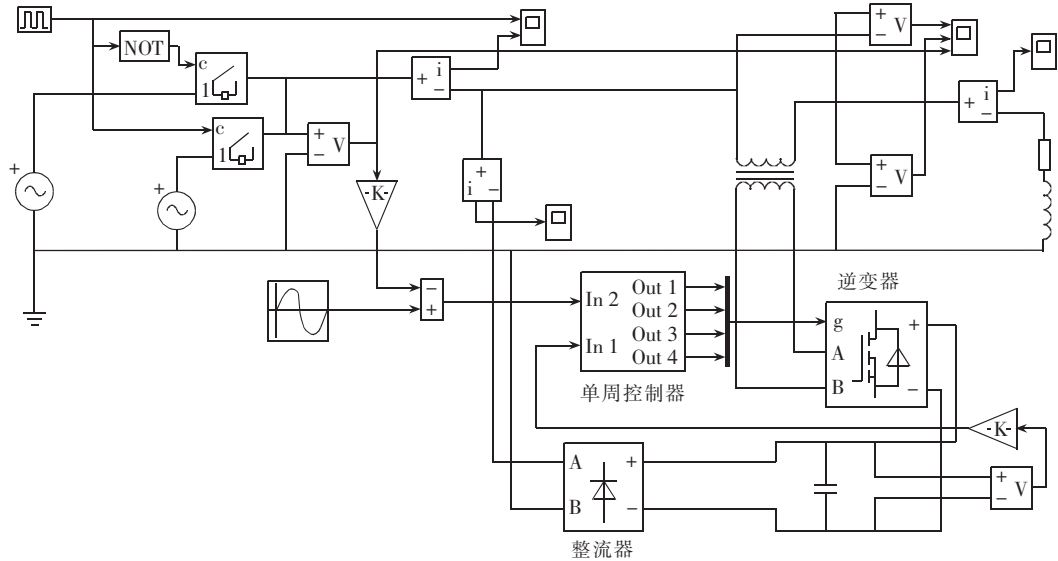


图 3 仿真电路
Fig.3 Simulation circuit

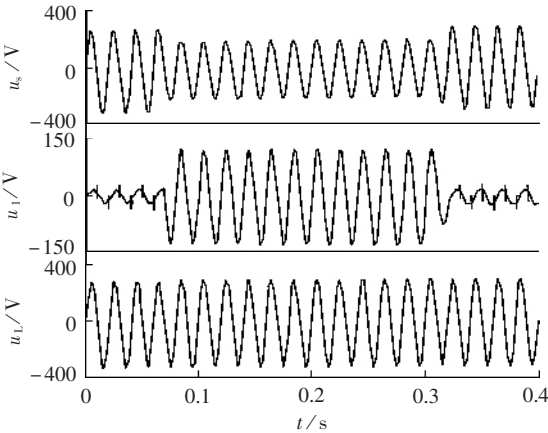


图 4 接 RL 负载、电源电压突降时的仿真波形
Fig.4 Simulative waveforms for RL load when u_s decreases abruptly

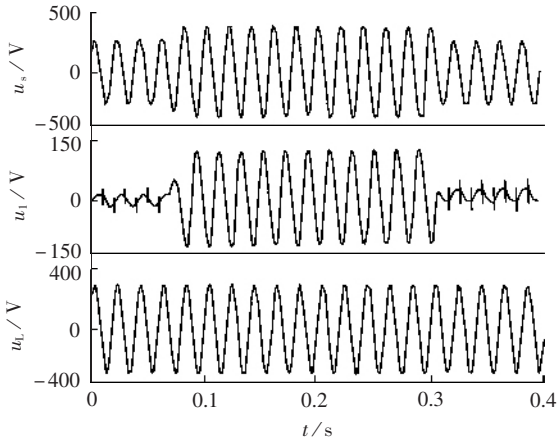


图 5 接 RL 负载、电源电压突升时的仿真波形
Fig.5 Simulative waveforms for RL load when u_s ascends abruptly

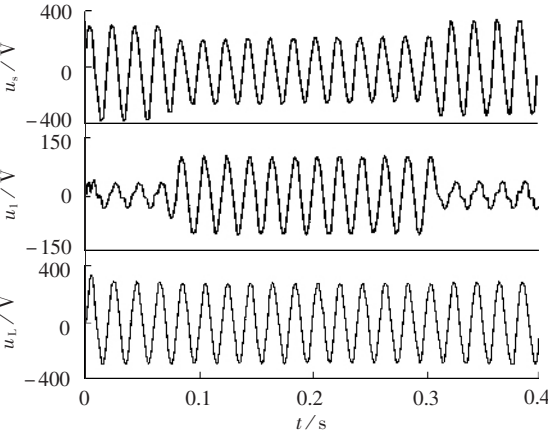


图 6 接 RC 负载、电源电压突降时的仿真波形
Fig.6 Simulative waveforms for RC load when u_s decreases abruptly

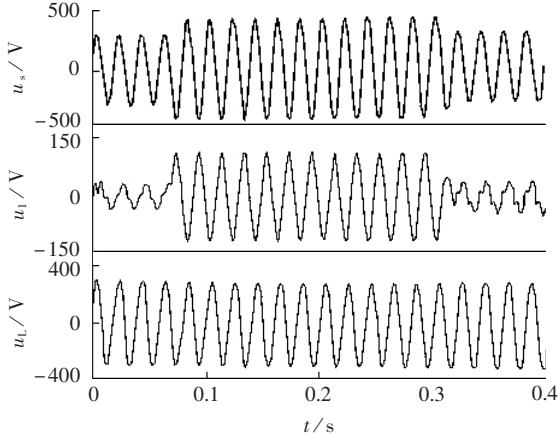


图 7 接 RC 负载、电源电压突升时的仿真波形
Fig.7 Simulative waveforms for RC load when u_s ascends abruptly

3 结语

从理论分析与仿真结果可得到以下结论。

a. 单周控制技术用于 DVR 控制完全可行, 可以作为 DVR 控制的一种新型控制方法。

b. 无论负载呈电容性或电感性, 当电源电压发生突变时, 单周控制 DVR 均可快速及时地跟踪电压变化把电压调节到额定值, 其动态跟踪性能很好。

c. 仿真中, 变压器电压 u_1 有效值最大约 80 V, 当通过变压器初级的电流为 5 A, 即负载为 1100 V·A 以上时, 变压器容量只需 400 V·A 左右。这表明所串联变压器的容量可以比负载的容量小得多, 基本为负载容量的 1/3 ~ 1/2。

d. 单周控制模型简单, 实现方便, 调节速度快, 调节精度高。

参考文献:

- [1] WOODLEY N H, MOORGAN L, SUNDARAM A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer [J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1999, 14 (3): 1181-1186.
- [2] EDWARD R W. Power quality issues—standard and guide-lines [J]. *IEEE Trans. on Industry Application*, 1996, 32(3): 625 - 632.
- [3] VOSS L, WEI HOLD M, ZUROWSKI R, et al. Application of SIPCON-S for voltage sag mitigation [C]// *Power Systems World'97*. Ventura, CA, USA; IEEE, 1997: 30-38.
- [4] WOODLEY N H, SENIOR P E. Field experience with dynamic voltage restorer (DVRTMMV) systems [C]// *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2000: 2864 - 2871.
- [5] 杨潮, 韩英铎, 黄瀚, 等. 动态电压调节器串联补偿电压研究 [J]. *电力自动化设备*, 2001, 21(5): 1 - 5.
YANG Chao, HAN Ying-duo, HUANG Han, et al. Study on series compensating voltage in DVR [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2001, 21(5): 1 - 5.
- [6] 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 [J]. *电力系统自动化*, 2002, 26(8): 41 - 44.
XIE Xu, HU Ming-liang, LIANG Xu, et al. Compensation range and control object of dynamic voltage restorer [J].

Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (8): 41 - 44.

- [7] 黄瀚, 杨潮, 韩英铎, 等. 配电网动态电压调节器控制策略的研究 [J]. *电网技术*, 2002, 26(1): 1 - 4.
HUANG Han, YANG Chao, HAN Ying-duo, et al. Study on control strategy of dynamic voltage restorer for distribution network [J]. *Power System Technology*, 2002, 26(1): 1 - 4.
- [8] WANG Kai-fei, ZHUO Fang, LI Yan-dong, et al. Three-phase four-wire dynamic voltage restorer based on a new SVPWM algorithm [C]// *IEEE Power Electronics Specialists Conference 35th Annual*. [S.l.]: IEEE, 2004: 3877 - 3882.
- [9] LEE Sang-joon, KIM Hyosung, SUL Seung-ki, et al. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2004, 19(3): 814 - 827.
- [10] LEE Sang-joon, KIM Hyosung, SUL Seung-ki. A novel control method for the compensation voltages in dynamic voltage restorers [C]// *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Nineteenth Annual*. [S.l.]: IEEE, 2004: 614 - 620.
- [11] SMEDLEY K M, CUK S. One-cycle control of switching converters [C]// *Power Electronics Specialists Conference, 22nd Annual IEEE*. [S.l.]: IEEE, 1991: 888 - 896.
- [12] SMEDLEY K M, CUK S. Dynamics of one-cycle controlled Cuk converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, 10(6): 634-639.
- [13] SMEDLEY K M. Integrators in pulse width modulation [switching circuits] [C]// *Power Electronics Specialists Conference, 27th Annual IEEE*. Baveno: IEEE, 1996: 773-781.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

李 承 (1957-), 男, 河南浚县人, 副教授, 博士, 主要从事电能质量分析与控制、有源电力滤波器等方面的研究;

邹云屏 (1945-), 男, 湖南祁东人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力电子装置、系统及其控制技术, 电力电子系统的计算机仿真, 电力电子在电力系统中的应用研究;

范 婕 (1982-), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波测量与治理。

Modeling and simulation of single-phase DVR based on one-cycle control

LI Cheng, ZOU Yun-ping, FAN Jie

(College of Electric & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The one-cycle control technique has better control precision, robusticity and dynamic follow performance. A one-cycle control scheme for single-phase dynamic DVR (Dynamic Voltage Restorer) is presented. Its principle is introduced and corresponding model is built up. Based on theoretical analysis, conditions with capacitive and inductive loads are simulated. Results demonstrate its effectiveness in DVR control.

Key words: DVR; one-cycle control; control model