

# 三相三线动态电压调节器的单周控制策略

李承, 邹云屏

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 提出了一种三相三线系统动态电压调节器 (DVR) 的单周控制模型, 把单周控制技术应用于 DVR 的控制中。在对主电路分析的基础上, 导出了 DVR 的单周控制模型, 并对电压暂降、暂升等情况进行了仿真实验分析。结果表明, 单周控制用于 DVR 有较好的控制补偿作用, 并兼有控制电路简单、动态响应好、实现方便等特点。单周控制用于 DVR 是一种可行的方案。

**关键词:** 动态电压调节器; 单周控制; 控制建模

## One cycle control of dynamic voltage regulator for three phase three wire systems

LI Cheng, ZOU Yun-ping

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

**Abstract:** A new one-cycle control scheme is proposed for dynamic voltage regulator in three-phase three-wires system, in this paper. One-cycle control is first used to DVR. The control model is given based on the analysis of main power circuit. And then conditions with voltage sagging to 65% of normal voltage and a voltage jumping up to 135% of normal voltage are simulated. The simulation results show that DVR with one-cycle control has a good compensating and control performance for voltage alternation limit in 35%. One-cycle control DVR has better dynamic performance, simply-controlled circuit and more convenient realization way. One-cycle control DVR is a feasible control scheme.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50277017).

**Key words:** dynamic voltage regulator; one-cycle control; control modeling

中图分类号: TM714.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)13-0044-05

## 0 引言

电力用户中常常有一些冲击性负荷, 这些负荷运行时会产生电压突变等电能质量问题。电压的短时跌落或升高, 有时就会给用户带来严重的经济损失<sup>[1,2]</sup>。从用户电力出发, 快速、可靠、动态地控制供电电压质量, 是实际中亟待解决的问题<sup>[3]</sup>。动态电压调节器 DVR (Dynamic Voltage Regulator) 为解决电压质量问题提供了一种有效途径<sup>[4]</sup>。

DVR 采用的控制方法, 对于其静态和动态特性有重要影响。对于 DVR 的控制方法, 已经有不少文献报道<sup>[5-7]</sup>。同时, 为改善控制特性, 提高控制精度, 同时简化控制电路, DVR 的控制技术的研究仍然是一个热点问题。

自单周控制被提出以来, 由于它具有响应速度快, 控制稳定性好, 控制电路简单、实现方便等特点<sup>[8,9]</sup>, 已被应用于电力变换器控制<sup>[10,11]</sup>, 功率因数

校正控制<sup>[12]</sup>, 开关型功率放大器控制<sup>[13]</sup>, 有源电力滤波器控制<sup>[14-17]</sup>等领域中。文献[18]首次把单周控制技术应用于单相 DVR 控制中。在此基础上, 本文研究了三相三线系统 DVR 的单周控制的可行性, 经过对三相 DVR 主电路理论分析, 得到了三相三线系统 DVR 的单周控制模型。在提出的控制模型基础上, 分别对电压暂降、暂升等情况进行了计算机仿真实验验证。理论分析与仿真实验结果表明, 单周控制用于 DVR 是一种可行方案, 它具有控制电路简单、动态响应快、补偿效果较好等特点。

## 1 系统构成

单周控制 DVR 的结构如图 1 所示。它由三相整流器、三相逆变器、三相变压器、单周控制器、三相电压检测电路、参考正弦信号生成电路以及直流母线电压泵生抑制电路等构成。单周控制器的输入信号有: 三相电压检测电路检测到的电压信号、三相参考正弦信号、变换器直流母线的电容电压经 PI 后的信号电压; 输出信号为驱动六个开关的

PWM 信号。

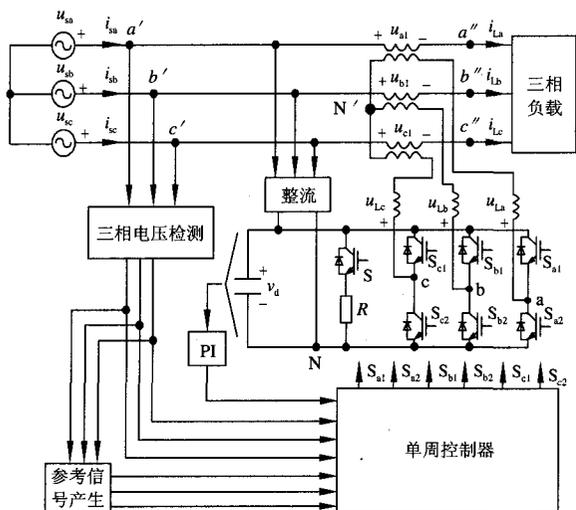


图 1 单周控制 DVR 系统结构图

Fig. 1 System configuration of the DVR with one cycle control

在电源电压发生暂降、暂升等情况时, DVR 把直流电压快速、准确地转化为所需的补偿电压, 并与电源电压串联, 使负载端电压保持为对称、稳定的三相电压。在电源电压发生暂变时, 变换器直流母线的电压也会随之变化, 有时甚至会有很大的变化, 而且这种变化没有固定的规律。

单周控制可以把直流母线电压的变化较好地转换为 PWM 波的变化。从单周控制器输入信号可以看到, 电源电压的变化以及直流母线电压的变化, 都对输出 PWM 信号有控制作用。特别是直流母线电压在相当大的范围内变化时, 单周控制器可以根据变化有效地调整 PWM 波的脉宽。

## 2 单周控制模型

在图 1 中, 设单周控制器时钟周期为  $T_s$ , 并设逆变器下面三个开关的导通占空比分别为  $d_a$ 、 $d_b$ 、 $d_c$ 。而每一个控制时钟周期  $T_s$  中, 由于变换器工作时上、下两个开关必须互补开通, 所以, 上面三只管子在一个时钟周期  $T_s$  内导通占空比分别为  $(1-d_a)$ 、 $(1-d_b)$ 、 $(1-d_c)$ 。因此, 从变换器直流侧看 a、b、c 三点相对于 N 点电位的平均值分别为

$$\begin{cases} \bar{u}_{aN} = \frac{1}{T_s} \int_{d_a T_s}^{T_s} V_d dt \\ \bar{u}_{bN} = \frac{1}{T_s} \int_{d_b T_s}^{T_s} V_d dt \\ \bar{u}_{cN} = \frac{1}{T_s} \int_{d_c T_s}^{T_s} V_d dt \end{cases} \quad (1)$$

由于开关频率远高于  $V_d$  的变化速度, 所以在一个时钟周期中可以把  $V_d$  看作常数。因此式 (1) 可写为

$$\begin{cases} \bar{u}_{aN} = (1-d_a)V_d \\ \bar{u}_{bN} = (1-d_b)V_d \\ \bar{u}_{cN} = (1-d_c)V_d \end{cases} \quad (2)$$

从变换器交流侧看, a、b、c 三点相对于  $N'$  点电位的分别为

$$\begin{cases} u_{aN'} = u_{a2} + u_{La} \\ u_{bN'} = u_{b2} + u_{Lb} \\ u_{cN'} = u_{c2} + u_{Lc} \end{cases} \quad (3)$$

由于  $v_{La}$ 、 $v_{Lb}$ 、 $v_{Lc}$  为滤波电感上的电压, 相对于变压器副边电压可忽略不计, 因此有

$$\begin{cases} u_{aN'} = u_{a2} \\ u_{bN'} = u_{b2} \\ u_{cN'} = u_{c2} \end{cases} \quad (4)$$

根据单周控制原理可知, 由于时钟频率远远高于各电压频率, 所以在一个时钟周期内各电压可视为不变的, 因此有

$$\begin{cases} u_{aN'} = \bar{u}_{aN'} \\ u_{bN'} = \bar{u}_{bN'} \\ u_{cN'} = \bar{u}_{cN'} \end{cases}, \begin{cases} u_{a2} = \bar{u}_{a2} \\ u_{b2} = \bar{u}_{b2} \\ u_{c2} = \bar{u}_{c2} \end{cases} \quad (5)$$

从图 1 可知

$$\begin{cases} u_{aN'} = u_{aN} + u_{NN'} \\ u_{bN'} = u_{bN} + u_{NN'} \\ u_{cN'} = u_{cN} + u_{NN'} \end{cases} \quad (6)$$

由于  $u_{aN'} + u_{bN'} + u_{cN'} = 0$ , 故从式 (6) 可得

$$u_{NN'} = -\frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \quad (7)$$

把式 (7) 带回式 (6) 有

$$\begin{cases} u_{aN'} = u_{aN} - \frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \\ u_{bN'} = u_{bN} - \frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \\ u_{cN'} = u_{cN} - \frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \end{cases} \quad (8)$$

由式 (4) 和式 (8) 整理后并写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{aN} \\ u_{bN} \\ u_{cN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

把式(9)两边取平均值后,再由式(2)、(4)、(5)、(9)可得

$$\begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} V_d = \begin{bmatrix} u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据文献[19]可知,方程(10)的解可以表示为

$$\begin{cases} d_a = k_1 + k_2 \frac{u_{a2}}{V_d} \\ d_b = k_1 + k_2 \frac{u_{b2}}{V_d} \\ d_c = k_1 + k_2 \frac{u_{c2}}{V_d} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)体现出单周控制方法对于每一相电压的解耦结果。把(11)时代入式(10)可得到  $k_2 = -1$ , 而  $k_1$  应满足

$$\frac{u_{a2}}{V_d} \leq k_1 \leq 1 + \frac{u_{a2}}{V_d} \quad (12)$$

因此式(11)可以写为

$$\begin{cases} (1 - \frac{d_a}{k_1})V_d = \frac{u_{a2}}{k_1} \\ (1 - \frac{d_b}{k_1})V_d = \frac{u_{b2}}{k_1} \\ (1 - \frac{d_c}{k_1})V_d = \frac{u_{c2}}{k_1} \end{cases} \quad (13)$$

另外,由变压器的电压变换关系可知

$$\begin{cases} u_{a1} = -k \cdot u_{a2} \\ u_{b1} = -k \cdot u_{b2} \\ u_{c1} = -k \cdot u_{c2} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中  $k$  为变压器的变比。根据供电回路

的电压关系,可以把式(14)改写为

$$\begin{cases} u_{a2} = \frac{1}{k}(u_{La} - u_{sa}) \\ u_{b2} = \frac{1}{k}(u_{Lb} - u_{sb}) \\ u_{c2} = \frac{1}{k}(u_{Lc} - u_{sc}) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中  $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$  和  $u_{La}$ 、 $u_{Lb}$ 、 $u_{Lc}$  分别为电源相电压和负载端等效相电压。把式(15)代入式(13),整理后可以得到

$$\begin{cases} (1 - \frac{d_a}{k_1})V_d = \frac{1}{kk_1}(u_{La} - u_{sa}) \\ (1 - \frac{d_b}{k_1})V_d = \frac{1}{kk_1}(u_{Lb} - u_{sb}) \\ (1 - \frac{d_c}{k_1})V_d = \frac{1}{kk_1}(u_{Lc} - u_{sc}) \end{cases} \quad (16)$$

在式(16)两边同时乘以一个常数  $K$  ( $K < 1$ ), 作为控制回路对主回路电压的取样系数,并令

$$\begin{cases} V'_d = KV_d \\ u'_{sj} = \frac{K}{kk_1}u_{sj}, \quad (j = a, b, c) \\ u'_{vj} = \frac{K}{kk_1}v_{Lj} \end{cases} \quad (17)$$

因此,式(16)又可以写为

$$\begin{cases} (1 - \frac{d_a}{k_1})V'_d = u_{ra} - u'_{sa} \\ (1 - \frac{d_b}{k_1})V'_d = u_{rb} - u'_{sb} \\ (1 - \frac{d_c}{k_1})V'_d = v_{rc} - u'_{sc} \end{cases} \quad (18)$$

根据单周控制原理<sup>[8]</sup>,式(18)又可以写为

$$\begin{cases} V'_d - 1/\tau \int_0^{\tau} V'_d dt = u_{ra} - u'_{sa} \\ V'_d - 1/\tau \int_0^{\tau} V'_d dt = u_{rb} - u'_{sb} \\ V'_d - 1/\tau \int_0^{\tau} V'_d dt = v_{rc} - u'_{sc} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中,  $\tau = 1/k_1 T_s$ , 为积分时间常数;  $V_d'$  是电容电压的取样值,  $u'_{sa}, u'_{sb}, u'_{sc}$  分别是电源侧三个相电压的取样值。

实际上, 对式(19)作进一步分析可知, 动态电压调节器的控制目标就是使负载端电压保持不变, 即使  $v_{La}, v_{Lb}, v_{Lc}$  的有效值保持为恒定值。当变压器确定后, 其变比  $k$  即为常数。  $K$  是变换器直流侧电压  $V_d$  的分压系数, 确定后也是常数。因此, 在负载线电压为常数时, 电压  $v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$  可以看作参考信号正弦信号。这里, 参考信号电压  $v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$  是根据检测到的电源电压而产生的, 它具有与电源电压同频率、同相位而其幅值稳定的特征。所以式(19)三个等式的右边就是电源相电压与参考信号的差值, 反映了电源相电压相对于参考信号的偏移量。而等式左边为对电容电压取样值的积分, 等式就是把左边的积分与右边的电压偏移量进行比较, 根据比较的结果调制脉冲的宽度。

根据式(19)可以画出单周控制原理图如图2所示。

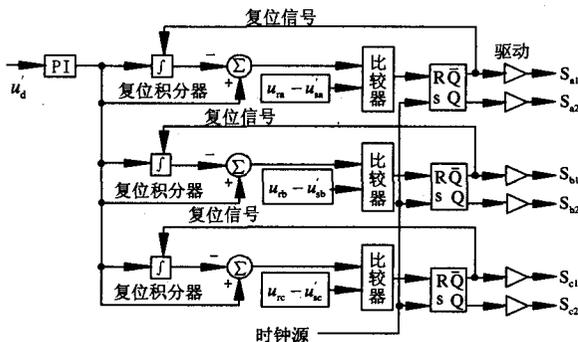


图2 动态电压调节器单周控制原理图

Fig. 2 One cycle control diagram of DVR

### 3 几种运行情况的仿真分析

为了验证理论分析所建立模型的正确性, 根据图1和图2设计仿真电路进行了仿真分析。仿真采用Matlab中的Simulink和Simpower systems完成。仿真条件为: 电源相电压幅值311V, 电源电压的突降、突升均为正常电压的35%, 即电压幅值突降到202V或电压幅值突升到420V, 持续时间从0.03~0.13s。负载三相总功率为7260W电阻性负载。电源电压突降、突升等情况下的仿真结果分别示于如图3、图4中。

在图3、图4中, 从上向下依次为: 电源电压波形、补偿电压波形、负载电压波形和负载电流波形。

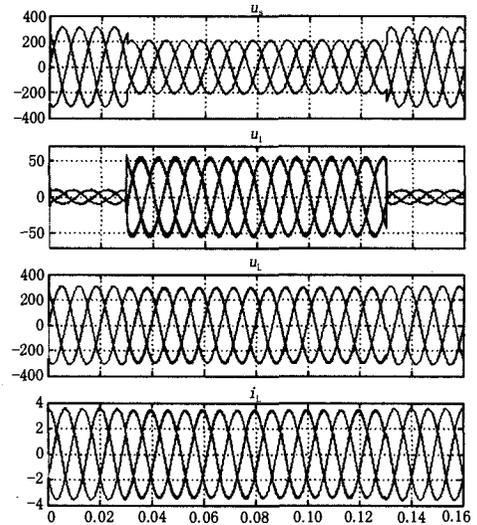


图3 电压突降到65%的仿真波形

Fig. 3 The simulation waveforms for a voltage sag to 65% of normal voltage

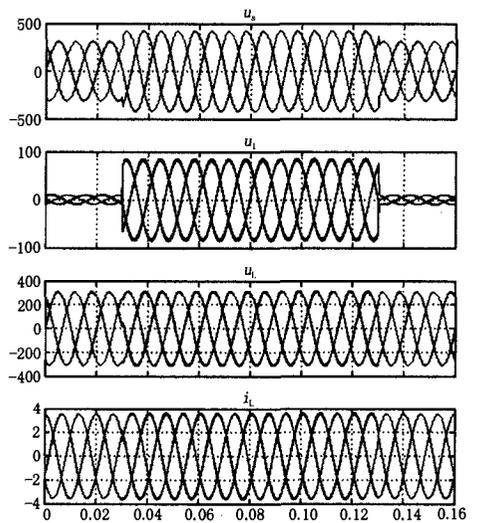


图4 电压突升到135%的仿真波形

Fig. 4 The simulation waveforms for a voltage jump up to 135% of normal voltage

从仿真波形可以得到以下几点结论:

- 1) 采用单周控制技术的三相动态电压调节器, 在电源电压发生突升或突降时, 可以快速有效地补偿电源电压的突升和突降, 使负载电压基本保持不变。
- 2) 单周控制动态电压调节器响应速度快, 时间延迟小, 这反映出其动态性能好的特点。
- 3) 在电压突升或突降期间, 负载电流与电源电流基本没有发生变化。这是负载端电压稳定的结果, 这进一步表明电压调节的有效性。

### 4 结论

从以上理论分析与仿真实验结果可以得到以下

## 结论:

- 1) 单周控制用于 DVR 控制是一种可行方法。
- 2) DVR 的单周控制具有电路简单、实现方便、动态效果好等优点。
- 3) 在电源电压暂降或暂升情况下,单周控制都体现出较好的控制效果。可以长时间补偿电源电压的升高与跌落变化。

## 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 Reid W. Power Quality Issues-Standard and Guidelines[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1996,32(3):625-632.
- [3] 姜齐荣,沈斐,韩英铎. 现代电能控制技术[J]. 电力电子技术, 2004, 38(6):1-7  
JIANG Qi-rong, SHEN Fei, HAN Ying-duo. Development of Modern Custom Power Technology[J]. Power Electronics, 2004,38(6):1-7.
- [4] 李江,李国庆,王振浩. P-q-r 理论在单相动态电压调节器中的应用[J]. 电网技术,2005, 29(17): 72-75.  
LI Jiang, LI Guo-qing, WANG Zhen-hao. Application of p-q-r Theory in Single-phase Dynamic Voltage Regulator[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 72-75.
- [5] ZHAN Chang-jiang, Ramachandaramurthy V K, Atputharajah Arulampalam, et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage-space- vector PWM Control[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(6): 1855-1863.
- [6] Lee Sang-Joon, Kim Hyosung, Sul Seung-Ki. A Novel Control Method for the Compensation Voltages in Dynamic Voltage Restorers[A]. In: Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '04. Nineteenth Annual IEEE[C]. 2004. 614-620.
- [7] WANG Kai-fei, ZHUO Fang, LI Yan-dong, et al. Three-phase Four-wire Dynamic Voltage Restorer Based on a new SVPWM Algorithm[A]. In: 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference[C]. 2004.3877-3882.
- [8] Smedley K.M. Integrators in Pulse width Modulation [switching circuits][A]. In: PESC '96 Record, 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference[C]. 1996.773-781.
- [9] Hsieh Guan-Chyun, Wang Chien-Ming. One-cycle Controlled Half-bridge Series-resonant DC to AC Inverter with Reduced Conduction Loss[A]. In: IECON 97. 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation[C]. 1997.786-791.
- [10] Midya P, Greuel M, Krein P T. Sensorless Current Mode Control-an Observer-based Technique for DC-DC Converters[A]. In: PESC '97 Record, 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference [C].1997.197-202.
- [11] Zheren Lai, Smedley K M, Yunhong Ma. Time Quantity One-cycle Control for Power-factor Correctors[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997: 369-375.
- [12] Lai Zhe-ren, Smedley K M. A New Extension of One-cycle Control and Its Application to Switching Power Amplifiers[A]. In: APEC '95. Conference Proceedings 1995, Tenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. 1995.826-831.
- [13] Qiao C, Smedley K M. Three-phase Active Power Filters with Unified Constant-frequency Integration Control[A]. In: Proceedings. The Third International Power Electronics and Motion Control Conference[C]. 2000. 698-705.
- [14] Qiao Chong-ming, Smedley K M. Three-phase Bipolar Mode Active Power Filters[J]. Trans on Industry Applications, 2002: 149-158.
- [15] Qiao Chong-ming, Jin Tao-tao, Smedley K.M. One-cycle Control of Three-phase Active Power Filter with Vector Operation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51(2):455-463.
- [16] LI Cheng, ZOU Yun-ping. One-cycle Control Active Power Filter for Three-phase Four-wire Systems[A]. In:IEEE ICPEA Proceedings[C]. Hong Kong(China): 2004. 11: 61-65.
- [17] 李承,邹云屏. 串联型有源滤波器的单周控制方法研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (15): 49-52.  
LI Cheng, ZOU Yun-ping. Series Active Power Filter Based on Voltage-source Inverter with one Cycle Control[J]. Automation of Electric Power Systems,2005, 29(15): 49-52.
- [18] 李承,邹云屏,范婕. 动态电压恢复器单周控制的建模与仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (4): 7-10.  
LI Cheng, ZOU Yun-ping, FAN Jie. Modeling and Simulation of Single-phase DVR Based on One-cycle Control[J]. Electric Power Automation Equipment,2006, 26(4): 7-10.
- [19] QIAO Cheng-ming, Smedley K M. Unified Constant-Frequency Integration Control of Three-phase Standard Bridge Boost Rectifiers with Power-factor Correction[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2003, 50 (1): 100-107.

收稿日期: 2006-11-29; 修回日期: 2007-03-14

## 作者简介:

李承(1957-),男,博士,副教授,主要从事电能质量分析与控制、智能仪器与嵌入式系统、神经网络应用等方面研究; E-mail:cheng-lyb@163.com

邹云屏(1945-),男,教授,博士生导师,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等研究。