

动态电压恢复器的双前馈控制策略研究

史伟伟,唐国庆,李俊

(东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 采用基于电网电压前馈的开环控制时,动态电压恢复器(DVR)动态响应速度快,但负载电压受负载电流影响较大;用比例积分(PI)调节器实现闭环控制可以减小这一影响,但动态响应速度变慢,且负载电压受电网电压影响变大。提出把负载电压看作 DVR 的控制对象,桥式电路中开关器件的占空比看作控制量,电网电压和负载电流看作干扰量,根据数学模型分析出被控对象不仅受控制量控制,而且受 2 个干扰量的影响。结合不同控制策略中控制量的计算方法,推导出各种控制策略下系统的传递函数,分析可知系统存在稳态误差的原因在于 2 个干扰量的影响。基于此,提出同时利用电网电压前馈和负载电流前馈的双前馈开环控制方法,既保持了开环控制动态响应速度快的优点,也可基本消除电网电压和负载电流对负载电压的影响。为避免电流前馈微分环节噪声影响,设计了用负载电压估计负载电流的估算方法。仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 动态电压恢复器; 电网电压前馈; 负载电流前馈; 稳态误差

中图分类号: TM 761+.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)02-0011-05

0 引言

近年来,电能质量问题日益严重,电压敏感性负荷不断增加,使得电能质量改善装置的开发受到了普遍关注。动态电压恢复器 DVR (Dynamic Voltage Restorer)就是其中的一种,其主要优点在于能有效补偿动态电能质量,从控制角度而言,DVR 不仅要求稳态误差小,而且要求动态响应速度快。为保证动态性能,目前普遍采用开环控制^[1-7]。但开环控制下,负载电压受负载电流影响较大,即存在稳态误差。为减小稳态误差,可以采用闭环控制策略。文献[8]采用了基于负载电流反馈的闭环控制策略,反馈采用比例环节。文献[9]采用了基于负载电压反馈的闭环控制,反馈采用比例积分(PI)环节。以上闭环方法减小了系统稳态误差,但并不能完全消除稳态误差,同时系统动态响应速度变慢。

本文把负载电压看作 DVR 的控制对象,桥式电路中开关器件的占空比看作控制量,电网电压和负载电流看作干扰量,根据数学模型可以分析出,被控对象不仅受控制量控制,而且受 2 个干扰量的影响。结合不同控制策略中控制量的计算方法,可以推导出各种控制策略下系统的传递函数,根据传递函数可以看出系统存在稳态误差的原因在于 2 个干扰量的影响。基于此,确定了基于电网电压和负载电流双前馈的基本控制思路。由于负载电流前馈需要微分环节,为避免微分环节产生噪声,所以提出了用负载电压估计负载电流的估算方法。利用此估算方法,建立了完整的双前馈控制方法。最后,通过仿真验证了该

方法的正确性,并通过和传统控制方法的对比分析验证了该方法的优越性。

1 DVR 数学模型

DVR 的单相功率电路如图 1 所示。

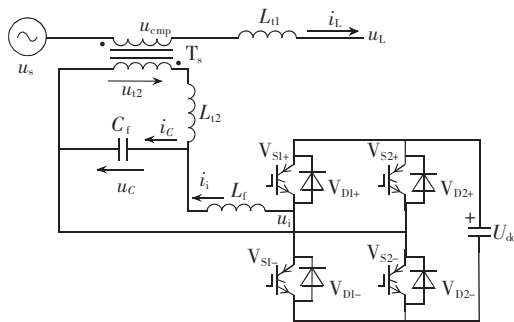


图 1 DVR 的单相功率电路图

Fig.1 Circuit of single-phase DVR

根据图 1 可以写出系统的电压方程如式(1)所示,式中主要参数及其参考方向与图 1 相同。

$$\begin{aligned} L_f \frac{di_i}{dt} &= u_i - u_c, & C_f \frac{du_c}{dt} &= i_i + i_{i2} \\ u_i &= (2d_i - 1)U_{dc}, & L_{i2} \frac{di_{i2}}{dt} &= u_{i2} - u_c \\ u_L &= u_s - u_{\text{cmp}} - L_{t1} \frac{di_L}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 d_i 为逆变器中开关管 V_{S1+} 和 V_{S2-} 的占空比。

在此,假设逆变器工作在双极性调制模式下,且开关频率足够高。

为简单起见,假设串联变压器的变比为 1,这样变压器原、副边电压和电流均相等,分别表示为 u_i 和 i_i ,同时设 $(2d_i-1)=k$ 。将式(1)简化,可以得到系统框图如图 2 所示。

收稿日期:2006-05-12

基金项目:江苏省博士后科研资助计划(1660631105);江苏省教育厅自然科学基金(04KJ13470010)

图中, $H_k(s)$ 、 $H_s(s)$ 、 $H_L(s)$ 分别表示 $k(s)$ 、电网电压 $u_s(s)$ 以及负载电流 $i_L(s)$ 到负载电压 $u_L(s)$ 的传递函数, 具体表达式如式(2)~(4)所示。

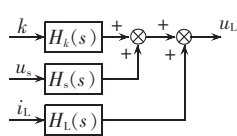


图 2 DVR 系统框图
Fig.2 Block diagram of DVR

$$H_k(s) = \frac{u_L(s)}{k(s)} = \frac{-U_{dc}}{L_f C_f s^2 + 1} \quad (2)$$

$$H_s(s) = u_L(s) / u_s(s) = 1 \quad (3)$$

$$H_L(s) = \frac{u_L(s)}{i_L(s)} = \frac{L_f s}{L_f C_f s^2 + 1} + (L_{l1} + L_{l2}) s \quad (4)$$

考虑到 LC 滤波器是为滤除开关纹波而设计的, 并且设计时要求其对系统低频特性的影响尽可能小, 所以在电网电压所包含的频率范围内, 可以有以下近似条件^[10]:

$$L_f C_f s^2 \ll 1$$

所以式(2)和(4)可以简化为

$$H_k(s) = u_L(s) / k(s) = -U_{dc} \quad (5)$$

$$H_L(s) = u_L(s) / i_L(s) = (L_f + L_{l1} + L_{l2}) s \quad (6)$$

结合上述几式, 可得负载电压表达式为

$$u_L(s) = u_s(s) - U_{dc} k(s) + (L_f + L_{l1} + L_{l2}) s i_L(s) \quad (7)$$

把负载电压 $u_L(s)$ 看作 DVR 的控制对象, $k(s)$ 看作控制量, 电网电压 $u_s(s)$ 和负载电流 $i_L(s)$ 看作干扰量, 则根据式(7)可以看出, 被控对象不仅受控制量控制, 而且受 2 个干扰量的影响。

2 基于电压前馈的开环控制方法

基于电压前馈的开环控制中, 首先检测电网电压并和标准电压比较, 然后将偏差作为逆变器输出的参考量进行脉宽调制(PWM)控制。根据上述过程, 可写出开环控制下控制量 $k(s)$ 的表达式为

$$k(s) = [u_s(s) - u_r(s)] / U_{dc} \quad (8)$$

式中 $u_r(s)$ 为参考负载电压。

结合式(7)(8), 可得负载电压表达式为

$$u_L(s) = u_r(s) + (L_f + L_{l1} + L_{l2}) s i_L(s) \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 系统存在稳态误差, 在电路参数确定以后, 其大小由负载电流决定。特别当负载电流含有谐波时, 各次谐波分量对误差的影响随着次数的增加而增强, 这是由滤波电感和变压器漏感的微分作用造成的。

3 闭环控制方法

为消除负载电流的影响, 文献[8]采用了基于负载电流反馈的闭环控制方法, 控制器采用比例控制。这种控制方法中控制量 $k(s)$ 的表达式如下:

$$k(s) = \frac{u_s(s) - u_r(s) + K_F i_L(s)}{U_{dc}} \quad (10)$$

式中 K_F 是电流反馈系数。

结合式(7)(10), 可得负载电压表达式为

$$u_L(s) = u_r(s) + [(L_f + L_{l1} + L_{l2}) s - K_F] i_L(s) \quad (11)$$

从式(11)可以看出, 该方法并不能消除负载电

流的影响。

文献[9]采用了负载电压反馈的闭环方法, 控制器采用 PI 控制, k 的表达式如下:

$$k(s) = [u_L(s) - u_r(s)] \left(K_p + \frac{1}{\tau_i s} \right) / U_{dc} \quad (12)$$

式中 K_p 和 τ_i 分别是 PI 环节比例系数和积分时间常数。

结合式(7)(12), 可得负载电压表达式如式(13)所示。

$$\begin{aligned} u_L(s) &= u_r(s) \frac{K_p}{1+K_p} \frac{s+1/(K_p \tau_i)}{s+1/[(1+K_p) \tau_i]} + \\ &u_s(s) \frac{1}{1+K_p} \frac{s}{s+1/[(1+K_p) \tau_i]} + \\ &i_L(s) \frac{L_f + L_{l1} + L_{l2}}{1+K_p} \frac{s^2}{s+1/[(1+K_p) \tau_i]} \end{aligned} \quad (13)$$

从式(13)可以看出, 负载电压由 3 部分构成, 第 1 部分由参考电压决定, 第 2 部分由电网电压决定, 第 3 部分由负载电流决定。第 1 部分是标准的单位负反馈 PI 控制传递函数, 该控制器只有在参考电压为直流时开环增益是无穷大, 稳态误差才为 0。对于 DVR 而言, 负载参考电压通常是幅值恒定、频率恒定(一般为 50 Hz)的标准正弦波, 在该频率下, 开环增益并不是无穷大, 存在稳态误差。第 2 部分是标准的 PI 反馈、单位增益传递函数, 对于电网电压中频率为 0 的分量, 其对应的输出为 0, 对于频率不为 0 的分量, 其对应的输出并不为 0, 且随着频率的增加越来越大。由于 DVR 主要用在电网电压质量不好的场合, 其中含有大量高频分量, 负载电压中存在由电网电压决定误差分量。第 3 部分是微分环节和 PI 反馈、单位增益环节串联的传递函数, 不仅具有和第 2 部分同样的问题, 并且微分环节还会放大高频分量, 所以负载电压受负载电流影响更大。另外, 由于积分环节的使用, 使得 DVR 系统的动态响应速度变慢, 且存在稳定性问题。

文献[9]在上述控制的基础上增加了电网电压的前馈, 使得 DVR 的响应速度有所增强, 同时基本消除了电网电压对负载电压的影响。

4 双前馈控制方法

首先, 假设理想控制量为 $k_r(s)$, 在理想控制量的控制下, 负载电压等于参考电压, 即

$$u_r(s) = u_s(s) - U_{dc} k_r(s) + (L_f + L_{l1} + L_{l2}) s i_L(s) \quad (14)$$

根据上式可得理想控制量为

$$\begin{aligned} k_r(s) &= \frac{u_s(s) - u_r(s) + (L_f + L_{l1} + L_{l2}) s i_L(s)}{U_{dc}} = \\ &\frac{u_s(s) - u_r(s)}{U_{dc}} + \frac{(L_f + L_{l1} + L_{l2}) s i_L(s)}{U_{dc}} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)包括 2 部分, 第 1 部分对应于电网电压的前馈, 第 2 部分对应负载电流的前馈, 这表明, 如果能够准确计算出 2 个前馈量就可以求出理想控制量。电网电压前馈量的计算非常容易, 但负载电流前馈实现困难。首先, 变压器漏抗很难精确测量, 并

且滤波器电感和变压器漏抗都会随着工作状态的改变而改变;其次,微分运算会将负载电流中的谐波放大。因此,实现这种方法的关键在于负载电流前馈量的计算。

用式(14)减去式(7)并作简单变换可以得到

$$\Delta k=k_r(s)-k(s)=[u_L(s)-u_r(s)]/U_{dc} \tag{16}$$

式中 Δk 表示实际控制量和理想控制量之间的偏差。

如果将上一采样周期的控制量偏差记录下来,并在本采样周期对控制量进行校正,可以避免前面提到的计算困难,但这样做的前提是 2 个采样周期之间的负载电流变化率偏差不大。由于采样速度比负载电流变化率的变化速度快得多,所以这一前提可以满足。由此得到负载电流前馈量估算表达式为

$$\Delta k(n)=[u_L(n-1)-u_r(n-1)]/U_{dc} \tag{17}$$

根据式(17)和(15)可得双前馈控制的控制量计算表达式为

$$k(n)=\frac{u_s(n)-u_r(n)}{U_{dc}}+\Delta k(n)$$
$$\Delta k(n)=\frac{u_L(n-1)-u_r(n-1)}{U_{dc}} \tag{18}$$

为验证该方法的正确性,下面用电磁暂态仿真软件 EMTDC 对 DVR 进行仿真研究,同时,为比较该控制方法和其他方法的各方面性能,仿真中作了大量的对比研究。

5 仿真研究

仿真中,串联变压器的漏抗为 2%,滤波电感为 3 mH,滤波电容为 10 μF,控制策略分别采用基于电压前馈的开环控制、闭环 PI 控制($K_p=2, \tau_i=0.01$ s)和双前馈控制。

首先,设电网电压在 0.3 s 时有 30% 的跌落,负载为 5 Ω 电阻,仿真结果如图 3 所示(图中 u_a 为 a 相电网电压,实线表示; u_{ar} 为 a 相参考电压,虚线表示; u_{La} 为 a 相负载端电压;后同)。

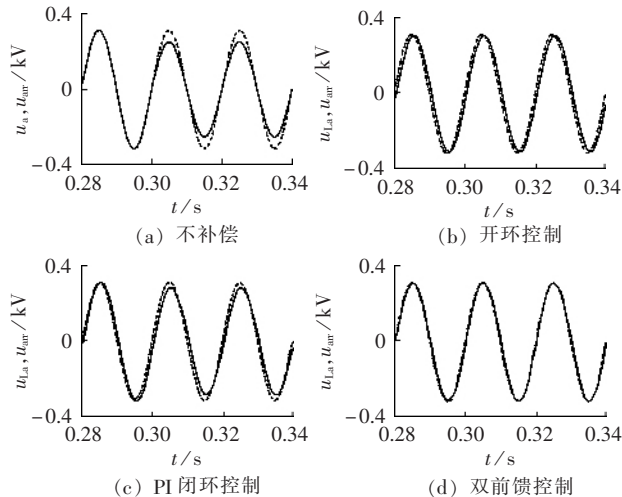


图 3 情况 1 负载端参考电压和实际电压波形

Fig.3 Reference and real voltages at load terminal(case 1)

从图 3(b)可以看出,开环控制存在稳态误差,且误差在电压跌落前后没有变化,这说明开环控制的效果与电网电压的变化没有关系,这是电网电压前馈的结果;从图 3(c)可以看出,在电压跌落前,闭环控制的稳态误差很小,这说明闭环控制对开环控制中的稳态误差有一定的校正作用,但电压跌落后有较大稳态误差,这说明电网电压对控制效果有影响;从图 3(d)可以看出,在电压跌落前后,双前馈控制都几乎没有稳态误差,这说明双前馈控制可以较好地校正稳态误差。另外,从图中也可以看出,双前馈控制的动态性能也较好。

其次,设电网电压在 0.3 s 时突然有 30% 的跌落,负载为 5 Ω 电阻和谐波电流源并联,谐波源电流幅值为 5 A,频率范围为 150~500 Hz,频率增量为 50 Hz。仿真结果如图 4 所示。

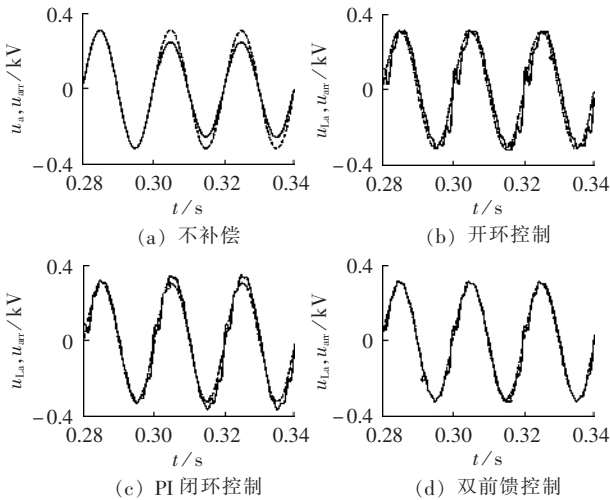


图 4 情况 2 负载端参考电压和实际电压波形

Fig.4 Reference and real voltages at load terminal(case 2)

从图 4(b)可以看出,在电压跌落前后,负载电压都存在较大谐波,结合图 3 的结论,说明开环控制的误差主要是由负载电流造成的;从图 4(c)可以看出,在电压跌落前后,负载电压都存在谐波,结合图 3 的结论,说明闭环控制虽然受负载电流的影响比开环小,但对谐波仍比较敏感,这正是式(13)中第 3 部分的微分环节作用结果;从图 4(d)可以看出,在电压跌落前后,负载电压都有较小的谐波,这首先说明双前馈控制比开环和闭环控制的效果都好,其次说明其不能完全消除负载谐波电流对控制效果的影响,这是因为在负载电流前馈量估算时是用上一个采样周期的误差来校正本周期的控制量,这样做的前提是 2 个采样周期之间负载电流变化率偏差,而谐波电流变化率的变化速度随着频率升高会在某些时刻出现较大的值,这是导致该控制方法出现偏差的原因。

为进一步说明双前馈控制方法的性能,下面对电网电压同时存在跌落和谐波、负载为电阻加谐波源的情况进行仿真,仿真结果如图 5 所示。从图中可进一步看出,所提出的双前馈控制方法比开环和闭环 PI 控制方法性能都好。

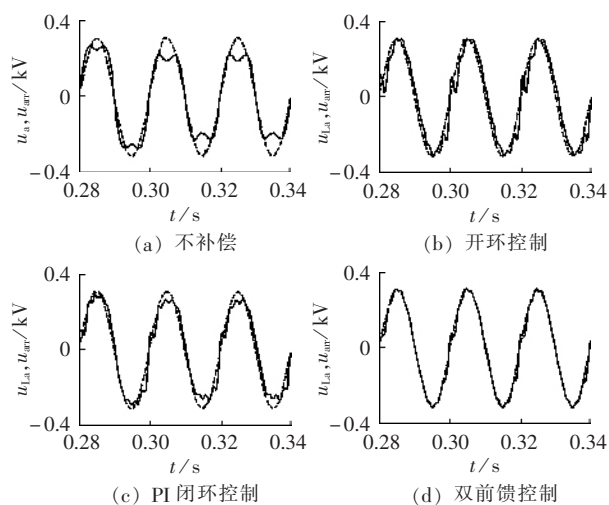


图5 情况3负载端参考电压和实际电压波形

Fig.5 Reference and real voltages at load terminal(case 3)

6 结论

DVR的补偿性能除了受控制量控制外,还受电网电压和负载电流2个干扰量的影响。基于电网电压前馈的开环控制中,由于采用了电网电压前馈,所以控制效果不受电网电压影响,同时由于未考虑负载电流,所以受其影响严重。闭环控制在一定程度上减小了负载电流的影响,但由于对电网电压扰动的抑制是通过负载电压反馈实现的,所以其响应速度不如开环控制快,同时由于其开环增益在频率不为0时为有限值,所以并不能完全消除电网电压的影响。另外,由于负载电流的干扰是通过变压器漏感和滤波电感的微分作用表现,所以对负载谐波电流影响的抑制作用随谐波频率的升高而进一步变坏。

双前馈控制方法由于在采用电网电压前馈的同时,增加了负载电流的前馈,所以电网电压和负载电流对控制效果的影响都很小,但由于在电流前馈估算时,采用上一采样周期的误差校正本周期的控制量,所以当负载电流存在频率很高的谐波时,校正效果会变差。但从仿真结果可以看出,双前馈控制方法从各方面而言都比开环和闭环控制效果好。

参考文献:

- [1] 史伟伟. 串联电能质量补偿器中脉宽调制技术和PWM整流器的研究[D]. 南京:东南大学,2002.
SHI Wei-wei. Research on the pulse-width modulation and PWM rectifier in series power quality compensator[D]. Nanjing: Southeast University,2002.
- [2] BRUMSICKLE W E, SCHNEIDER R S, LUCKJIFF G A, et al. Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(1): 212-217.
- [3] GHOSH A, LEDWICH G. Compensation of distribution system voltage using DVR[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(4): 1030-1036.
- [4] HUANG C J, HUANG S J, PAI F S. Design of dynamic voltage

restorer with disturbance-filtering enhancement[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18(5): 1202-1210.

- [5] 赵剑锋, 蒋平, 唐国庆, 等. 基于电压型逆变器的串联型电能质量补偿器与电力系统相互作用的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 75-78.
ZHAO Jian-feng, JIANG Ping, TANG Guo-qing, et al. Study of interaction between power system and VSI based series power quality compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 75-78.
- [6] 谢旭, 胡明亮, 梁旭, 等. 动态电压恢复器的补偿特性和控制目标[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] 张秀娟, 杨潮, 唐志, 等. 串联型电能质量控制器注入电压的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 15-20.
ZHANG Xiu-juan, YANG Chao, TANG Zhi, et al. The voltage injection analysis in series power quality controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 15-20.
- [8] YAN Hui, LI Jun, TANG Guo-qing, et al. Study of series power quality compensator with feedback control strategy for inverters [C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004(DRPT2004). Hongkong: [s.n.], 2004: 752-757.
- [9] 何益宏, 王群, 卓放, 等. 串联电压控制器的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 67-70.
HE Yi-hong, WANG Qun, ZHUO Fang, et al. Control strategy on series voltage controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 67-70.
- [10] 史伟伟, 蒋全, 胡敏强, 等. 串联型有源电力滤波器中低通滤波器的设计及参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 74-78.
SHI Wei-wei, JIANG Quan, HU Min-qiang, et al. Design and optimization of passive low-pass filters for series active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 74-78.
- [11] WODLEY N H, MORGAN L, SUNDARAM A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1181-1185.
- [12] CHOI S S, LI B H, VILATHGAMUWA D M. Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 857-864.
- [13] CHOI S S, LI B H, VILATHGAMUWA D M. Dynamic voltage restorer with minimum energy injection[J]. IEEE Transactions on Power System, 2000, 15(1): 51-57.
- [14] LI B H, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. A new control strategy for energy-saving dynamic voltage restoration [C]//Conference Proceedings of 2000 Power Engineering Society Summer Meeting. Piscataway: IEEE, 2000: 1103-1108.
- [15] KARA A, DAHLER P, AMHOF D, et al. Power supply quality improvement with a dynamic voltage restorer [C]//Conference Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New York: IEEE, 1998: 986-993.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

史伟伟(1975-), 男, 河南焦作人, 博士后在站, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail: sww75@sohu.com)。

Double feed-forward control strategy for dynamic voltage restorer

SHI Wei-wei,TANG Guo-qing,LI Jun

(Department of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: In open-loop utility voltage feed forward control,DVR(Dynamic Voltage Restorer) has fast dynamic response,but the load voltage is always greatly distorted by the load current. Closed-loop PI (Proportional-Integral) controller can reduce this effect,but the dynamic response speed is slowed down and the load voltage influenced by the utility voltage. Regarding the load voltage as the control object, the duty ratio of power devices as control variables,and the utility voltage and load current as interferences,it is found from the mathematic model of DVR that the system performance is always disturbed by these two interferences. Transfer functions of different system control strategies are derived and conclusion is drawn that,the system steady state error is caused by these two interferences. An open-loop double feed forward controller adopting both utility voltage and load current feed forward is thus proposed,which guarantees the fast dynamic response of open-loop control and eliminates influences of both utility voltage and load current. To avoid the noise caused by differential section in load current feed forward,estimation of load current with load voltage only is designed. Theoretical considerations are verified through simulations.

This project is supported by the Postdoctoral Scientific Program of Jiangsu Province(1660631105) and the Natural Science Foundation of Education Office of Jiangsu Province(04KJ13470010).

Key words: dynamic voltage restorer; utility voltage feed forward; load current feed forward; steady state error