

# 微电网动态电压恢复器控制补偿策略研究

Research on Micro-grid Dynamic Voltage Restorer Control Compensation Strategy

张 斌, 卢秀和, 李海铭, 李建波

(长春工业大学, 长春 130021)

**摘 要:** 针对微电网中由于光伏、风力条件的不确定性, 输出的电压跌落频率较高的问题, 为减少对设备的损坏, 保证电压的输出质量, 作为保护的动态电压恢复器 (DVR), 采用负载电压外环、电容电流内环的双闭环控制, 可提高输出电压的精度、系统阻尼性能以及负载适应能力。在补偿策略上, 在不同情况下分别采用全相补偿和最小能量补偿法, 以最终达到最满意的补偿效果。在理论分析基础上, 通过 Matlab 仿真对上述方法进行验证, 结果验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 动态电压恢复器; 电压跌落; 双闭环控制; 补偿策略; Matlab

**Abstract** Because of the uncertainty of the photovoltaic and the wind conditions in Micro-grid, the frequency of the voltage sags is high. In order to reduce damage to the equipment and ensure the quality of the output voltage, the dynamic voltage restorer (DVR) is used in the system. It is effectively used in mitigating voltage sags. The controller of DVR is a core. Its performances play a key role in DVR with excellent functions. Therefore, the control strategy using the load voltage and capacitor current double closed-loop feedback control is proposed. The accuracy of the output voltage, the damping performance and load capacity are improved. The full phase compensation and minimum energy compensation method are used in different situation in compensation strategy. Finally, the system is simulated on the basis of theoretical analysis in Matlab. The result show the feasibility and effectiveness of the method.

**Key words** dynamic voltage restorer; voltage sags; double-loop control; compensation strategy; Matlab

中图分类号: TM714.3; TM76

文献标志码: A

文章编号: 1009-5306(2013)04-0021-04

微电网是近年来发展的一种新型网络结构, 主要包括一组微电源、负荷、储能系统和控制装置。微电网是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 可以与外部电网并网运行, 也可以孤立运行。微电网目前以光伏和风力发电为主, 在电压输出中依然存在一些问题, 由于光伏和风力在转换过程中, 受外界天气等因素的影响, 并网前的逆变电压波动比较大, 电压不平稳, 因此, 本文选择在输出电压处采用动态电压恢复器 (DVR) 来减少谐波对设备的损坏以及一些保护继电器的误动作。基于电力电子技术的动态电压恢复器是近年来出现的配电系统柔性交流输电 (DFACTS) 装置, 其串联于电源与敏感负载之间, 具有良好的动态特性, 当发生电压跌落时, 能在毫秒级内有效地补偿电压跌落, 还能抑制电源电压中的谐波、闪变等干扰, 是抑制动态电压干扰的有效装置。

DVR在输出补偿电压的同时与系统进行着功率交换, 要求电压跌落持续时间较长时要尽量降低动态电压恢复器与系统的有功交换, 可以通过补偿策略来实现。本文采用外环为负载电压反馈、内环为滤波电容电流反馈的双闭环反馈控制。滤波电容电流与输出电压的变化率成正比, 有更好的动态性能。本文提出的基于全相补偿法和最小能量补偿法的综合补偿策略, 这种补偿策略考虑了电压跌落的持续时间和特点, 综合应用, 既可以保证补偿质量, 又可以延长补偿时间。

## 1 DVR的原理与数学模型

### 1.1 DVR工作原理

动态电压恢复器主要由储能单元、电压型逆变

收稿日期: 2013-07-08

作者简介: 张 斌 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电气传动。

器、控制单元、滤波和耦合单元组成。当动态电压恢复器进行补偿时,控制单元控制逆变器产生串联补偿电压,然后经耦合单元注入到线路中。输出滤波器用于滤除逆变器所产生的高次谐波,储能单元用于提供补偿所需的有功功率。本文采用的DVR结构如图1所示。图1中: $u_s$ 为电网系统电压, $z_s$ 为电网系统等效阻抗; $u_p$ 为电网公共接入点(PCC)电压, $u_D$ 为DVR输出的补偿电压, $u_L$ 为负载电压, $C_f$ 为滤波电容, $L_f$ 为滤波电感, $R_f$ 为滤波电阻, $Z_L = R_L + j\omega L_L$ 为负载阻抗。

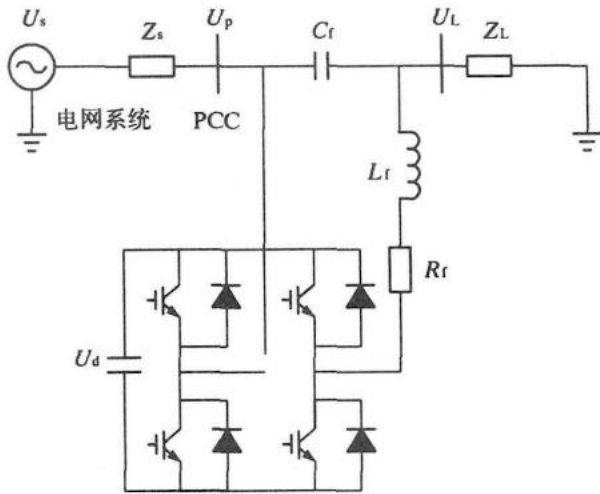


图1 单相DVR结构图

对于微电网的低压系统,本文中采用三单相全桥结构。三相补偿电压之间相互独立,可输出正序、负序和零序补偿电压。逆变器采用正弦脉宽调制(SPWM),用滤波器滤除产生的大量高次谐波。提出无串联变压器直接耦合到系统中,这样减少了串联变压器在使用中引起的附加相移、产生谐波损耗等问题。

### 1.2 数学模型

DVR的单相等效电路图如图2所示。图中: $u_{in}$ 为DVR的逆变器输出的电压; $i_L$ 为负载电流; $i_C$ 为滤波电容电流; $i_f$ 为滤波电感电流。

由图2可得单相DVR的状态方程为:

$$u_L = u_p + u_D \quad (1)$$

$$i_C = i_C + i_L \quad (2)$$

$$i_C = C_f \frac{du_D}{dt} \quad (3)$$

$$u_{in} = u_D + R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (4)$$

## 2 双闭环控制策略的研究

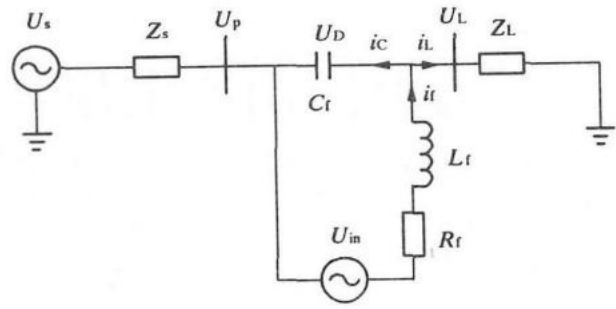


图2 单相DVR等效电路图

DVR的滤波电容电流与滤波器输出电压的变化率成正比,适当调节电容电流的参量也能较好地控制输出补偿电压的目的。用 $U_L(s)$ 作为电容电流的输入量,通过电容电流反馈组成一个内环控制系统,输出仍作为逆变器的控制量,即采用负荷端电压外内环的双闭环控制策略。图3是设计的双闭环控制系统框图。图中: $K_v + \frac{K_v}{f_s}$ 为PI调节器的传递函数; $K_m$ 为逆变器等效放大倍数; $T$ 为电流内环放大倍数; $U$ 是电压外环放大倍数; $I_L(s)$ 是滤波电感电流; $I_L(s)$ 是负载电流。

由图3可得到 $U_L(s)$ 对 $U_L^*(s)$ 和 $U_s(s)$ 的传递函数为:

$$G_{O1} = \frac{k_m k_v (1 + f_s)}{f_s (LCs^2 + k_m (CT_s + 1) + k_m k_v U (1 + f_s))} \quad (5)$$

$$G_{O2} = \frac{f_s}{f_s (LCs^2 + k_m (CT_s + 1) + k_m k_v U (1 + f_s))} \quad (6)$$

根据图3,可得到输出负载电压对负载电流的传递函数为:

$$G_i = \frac{U_L(s)}{I_L(s)} = \frac{-L f_s^2}{LC f_s^2 + k_m TC f_s^2 + k_m k_v U f_s + k_m k_v U} \quad (7)$$

反馈控制可以根据输出补偿电压误差的大小和方向控制,减少补偿电压的偏差,在一定程度上消除变压器的内阻和漏抗产生的幅值和相位的误差。

## 3 补偿策略的研究

DVR通过输出特定的电压来补偿故障电压和正常电压之差,维持负荷侧电压的稳定。DVR需要与系统有一定的有功功率交换,该交换过程会影响到直流储能单元以及相应充电单元的容量和结构,因此,合理的补偿策略是非常必要的。

本来采用文献[1]提出的两种补偿方法,在电压跌落程度较浅,DVR可以实现电压的全相补偿;在电压跌落程度很深,DVR也不能实现全相补偿,这

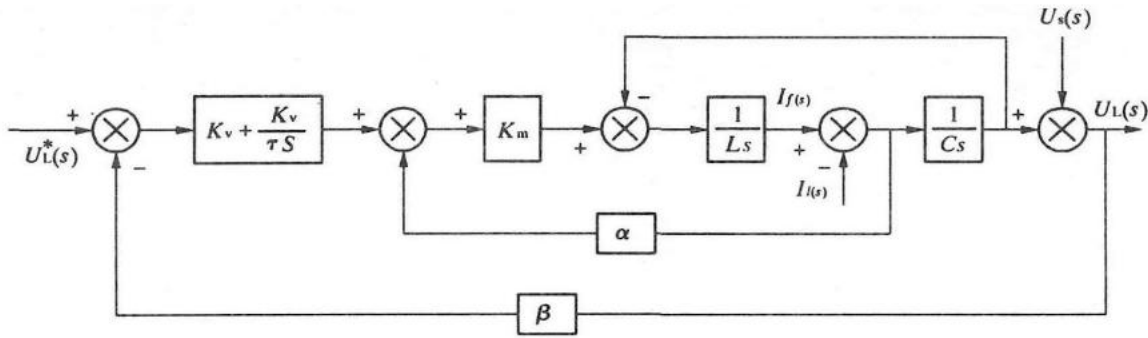


图3 双闭环反馈控制系统框图

时 DVR 需要最小能量补偿,使其获得更长的补偿时间。

### 3.1 全相补偿法

系统发生电压跌落时,通常是电压幅值的减小伴随着电压相位的改变。为了能使电压恢复到跌落前的状况,最一般的考虑系统补偿跌落前后的电压差值,使补偿后电压和跌落前电压保持一致。全相补偿法原理如图4所示

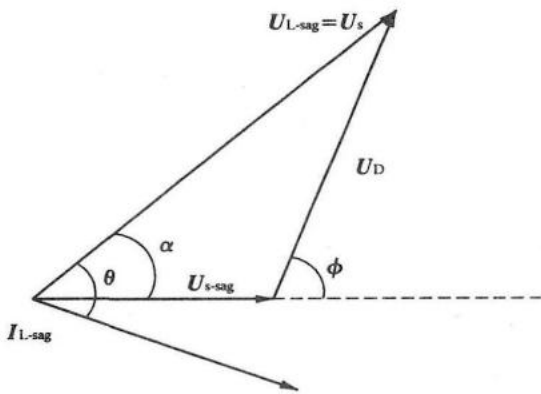


图4 全相补偿向量图

图4中,  $U_s$  是电压跌落前负荷电压向量,  $U_{L-sag}$  是补偿后的负荷电压,  $U_{s-sag}$  是跌落后系统侧电压向量,  $U_D$  是 DVR 输出的补偿电压,  $U_{L-sag}$  是跌落后负荷电流。可以由上图看出有  $\pi$  相位跳变,  $\theta$  是负荷的功率因数角。

补偿电压向量的幅值  $U_D$  和相角  $h$  如下:

$$U_D = \sqrt{U_s^2 + U_{s-sag}^2 - 2U_s U_{s-sag} \cos T} \quad (8)$$

$$h = \arctan\left(\frac{U_s \sin T}{U_s \cos T - U_{s-sag}}\right) \quad (9)$$

### 3.2 最小能量补偿法

最小能量补偿法是控制补偿后的负荷端电压向量的相位,保持负荷端电压幅值与跌落前相同,使 DVR 输出的有功功率最小。这样可以减少 DVR 装置的储能单元容量。最小能量补偿原理见图5

#### 3.2.1 当 $U_{s-sag} < U_s \cos \theta$ 时

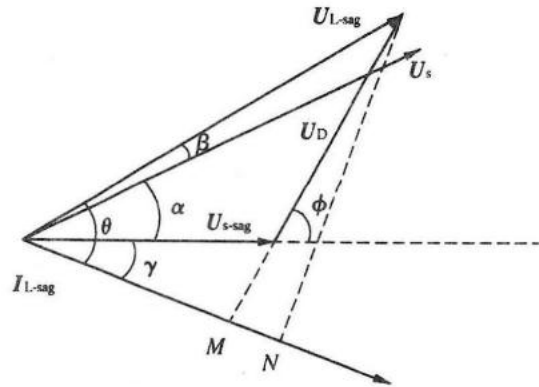


图5 最小能量补偿原理图

系统在跌落深度很大时,不论在圆弧上补到哪个点,系统功率都不能满足负荷功率需求, DVR 必须输出有功。而当  $U_{s-sag}^*$  和  $I_{L-sag}^*$  同相时, DVR 输出有功最小,此时电压幅值和功率为:

$$U_D = \sqrt{U_s^2 + U_{s-sag}^2 - 2U_s U_{s-sag} \cos \theta} \quad (10)$$

$$P_D = (U_{L-sag} \cos \theta - U_{s-sag}) I_{L-sag} \quad (11)$$

#### 3.2.2 当 $U_{s-sag} \geq U_s \cos \theta$ 时

系统跌落程度很深,系统剩余电压能在  $U_{L-sag}^*$  位于某个相位时满足负荷的全部功率需求, DVR 的有功输出为 0,为最小功率输出,可以实现长时间补偿。此时 DVR 输出的电压幅值和功率为:

$$U_D = \sqrt{U_s^2 + U_{s-sag}^2 - 2U_s U_{s-sag} \cos(\theta - \psi)} \quad (12)$$

$$P_D = 0 \quad (13)$$

DVR 的最小能量补偿可以使 DVR 输出的有功功率最小,可减小储能装置的容量或者延长补偿时间。

## 4 Matlab仿真

本文对上述控制和补偿策略用 Matlab/Simlink 软件进行仿真。仿真模型主电路如图6所示。仿真结果见图7。

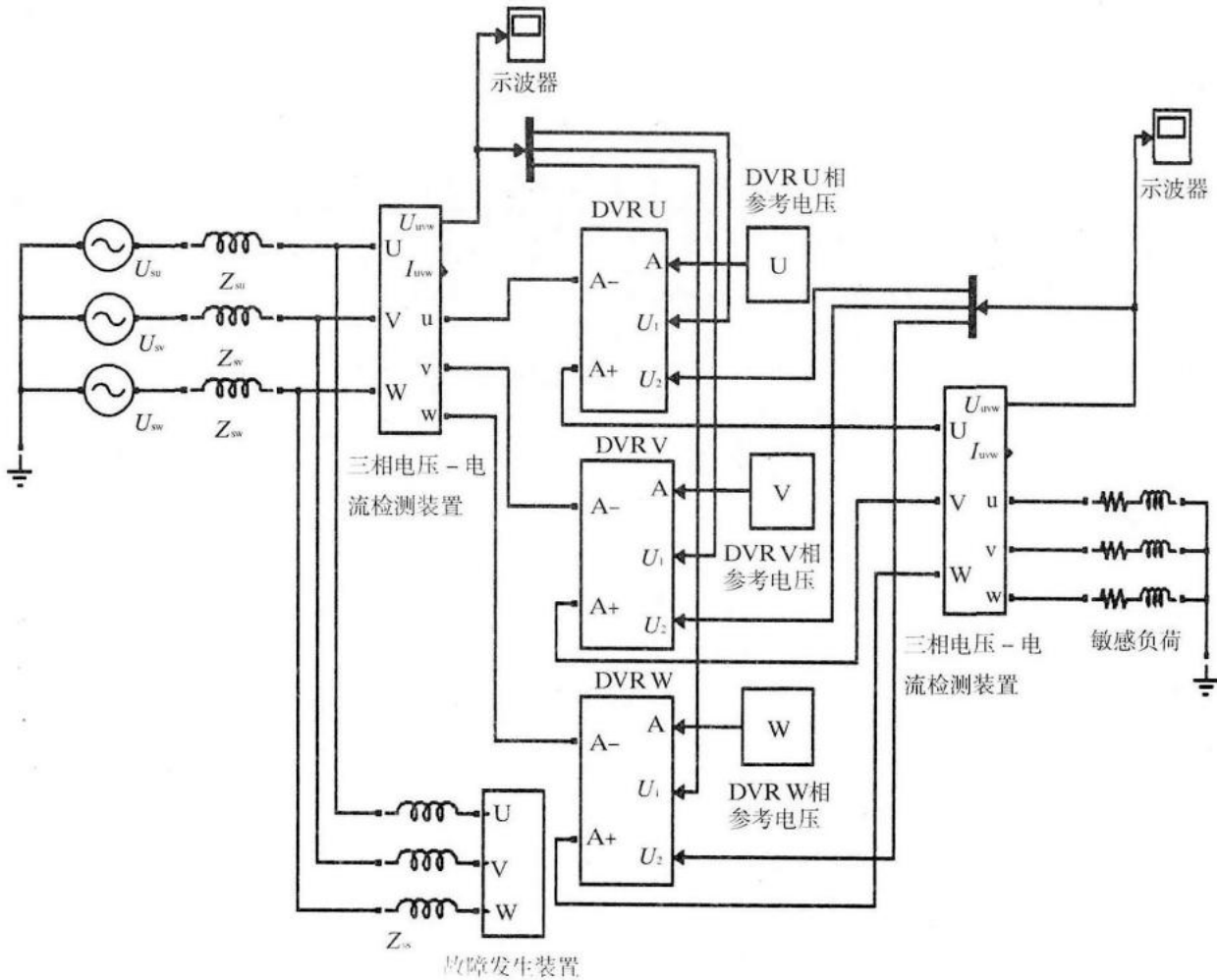


图6 仿真模型主电路

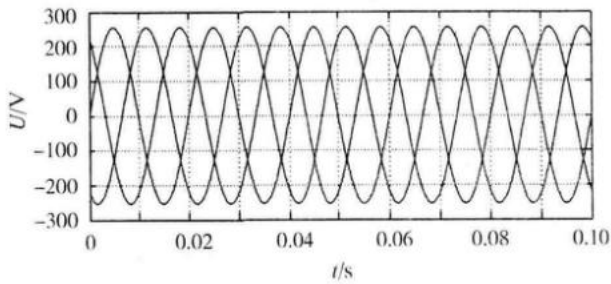


图7 跌落30%时补偿后结果

力装置。本文采用负载电压外环、电容电流内环的双闭环控制,提高DVR装置的阻尼比,从而较好地抑制了系统超调量,减少系统震荡次数。针对不同情况下补偿策略的不同选择,可以获得更长的补偿时间。采用Matlab/Simlink进行仿真,验证了补偿策略和控制策略的有效性。

参考文献:

- [1] 侯世英,刘早晨.基于最小有功注入策略的新型级联H桥逆变器动态电压恢复器[J].电网技术,2009,33(17):96-101.
- [2] 冯小明,杨仁刚.动态电压恢复器电压补偿策略的研究[J].电力系统自动化,2004,28(6):68-72.
- [3] 刘颖英,肖湘宁,徐永海.动态电压恢复器的能量稳定补偿特性分析[J].中国电机工程学报,2010,30(13):69-74.

仿真结果显示,在控制和补偿策略下,控制器能够按照预想的目标对系统进行控制,DVR动态响应迅速,补偿效果明显,可以满足保护敏感负荷不受电压跌落影响的要求。DVR具有良好的动态特性,对电压跌落有很好的调节作用。

5 结论

DVR是治理电压跌落问题的最经济、有效的电

(编辑 李健平)