

直流微电网电压平衡器的控制策略

刘喜梅 贺 瑞 张 鹏

(青岛科技大学自动化与电子工程学院 青岛 266000)

摘要: 提出了一种适用于直流微电网负荷不平衡的电压平衡器控制方法,为直流微电网系统用户端提供稳定可靠的直流供电。根据电压平衡器主电路拓扑结构,通过状态空间平均法对其建立小信号模型,在电路模型分析的基础上引入 PWM 控制技术,采用 PI 环节实现输出电压的平衡控制,保证平衡器输出端的稳定,抑制负荷扰动对直流输出电压的影响。利用 MATLAB 仿真软件搭建了 15 kW 的实验样机,并在负荷变动的情况下对电压平衡器进行仿真验证。仿真结果表明了理论的正确性及所提出控制策略的有效性。

关键词: 直流微电网;电压均衡控制;状态空间平均法;PWM 控制

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Control strategy of DC micro-grid voltage balancer

Liu Ximei He Rui Zhang Peng

(College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: A control strategy of voltage balancer which is suitable for DC micro-grid load unbalance is proposed to provide a stable and reliable DC power for DC micro-grid system clients. According to voltage balancer main circuit topology, the small signal model of voltage balancer was established through state space averaging method. PWM control technology and PI sectors were introduced on the basis of the analysis of the circuit model to achieve the output voltage balance control and ensure the stability of the output of the balancer. It also suppresses the influence of load disturbance on the DC output voltage. A prototype with capacity size of 15 kW was built in MATLAB simulation software and the case of load variations on voltage balancer was simulated to verify the proposed method. Simulation results show the correctness of the theory and validity of proposed control strategy.

Keywords: DC micro-grid; voltage balance control; state space averaging method; PWM control

1 引言

直流微电网作为一种新型直流输配电系统,随着智能电网等新能源发电技术的发展逐步成为研究热点。相较传统交流方式传输的交流微电网,直流微电网灵活的运行方式便于实现可再生能源或其他分布式能源的对接,可以运行于并网模式及孤岛模式。诸如目前大力发展的新能源(风能、光伏电池、燃料电池)及储能单元蓄电池等直流微电源无需 DC/AC 逆变转换与交流大电网相连转而并入直流微电网,实现节能优化、低碳的目的;而风力发电机和微型燃气轮机等交流微电源则可以通过 AC/DC 变流器连接到直流微电网中,不受频率和电压相位问题的约束^[1-2]。直流微电网极大地减少了能量传输过程中引起的线路损耗,在节能的同时提高了供电质量的可控性及可靠性,满足电力负荷对优质供电的要求。

控制直流微电网的电压稳定对于确保微电网稳定运行具有重大意义。微电网通常模较小且负荷变化较快,并网和独立运行时易发生电压失稳,甚至危及电网系统的正常运行^[3]。为稳定母线电压,直流微网中引入蓄电池来维持电压的稳定性。近年来,容量高达法拉级的超级电容通过串联或并联的方式构成电容模块组并入电网实现电能交换,使输出电压达到供电标准^[4-6]。即使直流母线电压采取了各种保护措施来维持其稳定性,当连接到直流母线上的负载和电源投入或切除微电网时,直流母线电压仍会出现微小的波动。

直流微电网的输电方式决定输出电压只能为一个等级,这将无法满足多样的用电设备对供电标准的不同需求。在直流母线端添加电压平衡器不仅可以优化输出的母线电压,同时还可以引出多级电压^[7-9]。文献^[10]采用的整流级联 H 桥结构对直流侧电容电压平衡控制比较复杂而且当

出现电压不平衡后恢复不够迅速。文献[11]提出了一种适用于直流微电网的三电平半桥平衡器,但半桥拓扑结构降低了电路的可靠性。

一种适用于直流微电网的电压均衡电路,当挂载到微网的负载发生变化时维持负载侧输出电压的稳定。该电压平衡器能有效解决负荷不平衡问题导致电压波动的影响。在分析电压均衡器工作原理的基础上提出了合理的控制策略,最后进行仿真试验。仿真结果表明电压平衡器的控制策略能够有效实现电压平衡,在稳定负荷电压的同时,提高了负荷电能质量。

2 电压平衡器电路拓扑结构与建模

电压平衡器电路拓扑结构如图1所示。图中 U_g 与 U_{out} 分别为电压平衡器的输入与输出电压, U_{cp} 与 U_{cd} 分别表示输出端不平衡负荷上的电压。开关管 T_1 和 T_2 为全控型电力电子开关器件IGBT,分别独立控制上下臂通断,形成两种电路工作模式。平衡电感 L 在电压平衡器中作为负载元件吸收电能,同时充当电源向电路供电释放能量。电感的大小将显著影响电流纹波及输出电压的稳定速度^[12]。

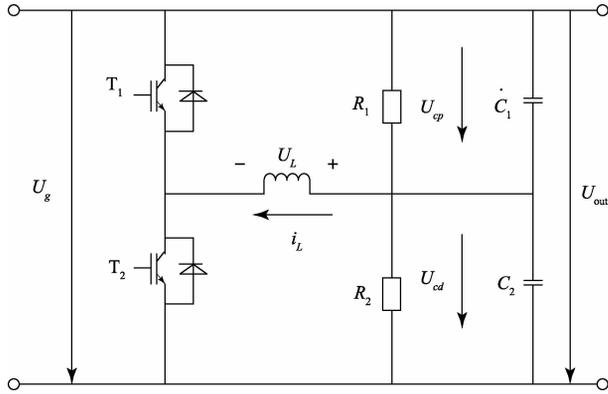


图1 电压平衡器电路拓扑结构

设开关管 T_1 的周期为 T_s ,占空比为 D ,通过状态空间平均法对图1所示电路拓扑结构进行建模分析。选取电感电流 i_L 及电容 C_1 的电压 U_{cp} 为状态变量:

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

选取 $U_g(t)$ 作为输入变量:

$$U(t) = U_g(t) \quad (2)$$

选取平衡电感电流 i_L 、负荷 R_1 、 R_2 两端电压即电容器 C_1 、 C_2 的电压 U_{cp} 和 U_{cd} 作为输出变量:

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \\ U_{cd}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

下面分阶段列写电压平衡器工作的状态方程,当 $0 \leq t \leq dT_s$,开关管 T_1 导通, T_2 截止,此时电路的状态方程如

式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} L_b & 0 \\ 0 & C_1 + C_2 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} U_g(t) \quad (4)$$

当 $dT_s \leq t \leq T_s$,开关管 T_1 关断, T_2 导通,此时电路的状态方程如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} L_b & 0 \\ 0 & C_1 + C_2 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} U_g(t) \quad (5)$$

将状态变量在一个开关周期内求平均,可得式(6)所示的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} L_b & 0 \\ 0 & C_1 + C_2 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2D-1 \\ 1-2D & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ U_{cp}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-D \\ \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} U_g(t) \quad (6)$$

式(6)也是电路的静态工作点,对稳态叠加小信号扰动量之后可得:

$$d(t) = D + \hat{d}(t)$$

$$x(t) = X + \hat{x}(t)$$

$$U(t) = U + \hat{U}(t) \quad (7)$$

消去稳态分量并忽略二阶交流小量,即可得到电路的小信号模型:

$$\begin{bmatrix} L_b & 0 \\ 0 & C_1 + C_2 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{U}_{cp}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2D-1 \\ 1-2D & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_L(t) \\ \hat{U}_{cp}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-D \\ \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \hat{U}_g(t) + \begin{bmatrix} 2U_{cp} - U_g \\ -2i_L \end{bmatrix} \hat{d}(t) \quad (8)$$

由式(8)所示的状态方程求得电路从输入到输出的传递函数为:

$$\frac{\hat{U}_{cp}(s)}{\hat{U}_g(s)} \Big|_{\hat{d}(s)=0} = \frac{L_b s + (1-D)(1-2D)}{L_b(C_1 + C_2)s^2 + L_b \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) s + (2D-1)^2} \quad (9)$$

由式(9)可以看出通过改变占空比进行PWM调制,控制电容电压 U_{cp} 和 U_{cd} ,可以实现电压平衡控制。

3 电压平衡器的控制策略

平衡器主要针对不对称负荷实现电压的平衡,当负荷不对称时,即 R_1 与 R_2 阻值不相等,电容电压需稳定在 $U_{cp} = U_{cd}$, 以确保微电网不受不平衡负荷的影响。

根据上述对电路拓扑的建模分析,采用如图 2 所示的控制策略对电压平衡器进行控制。2 个开关管由独立的闭环控制,各自独立工作。当 $U_1 > U_2$ 时,控制开关

管 T_1 的选择电路输出调制波, T_2 管处于截止状态;当 $U_1 < U_2$ 时,控制 T_2 的选择电路输出调制波, T_1 管处于截止状态。图 2 所示的电压平衡控制方案中, U_{ref} 为控制电压参考值,分别将输出电压 U_{cp} 与 U_{cd} 作为反馈变量,参考电压值 U_{ref} 与实际电压值 U_{cp} 与 U_{cd} 之间的误差通过电压 PI 环节后产生调制波,与三角载波比较输出开关管触发信号,由此实现 PWM 控制,也就是改变建模分析中的变占空比 D 。

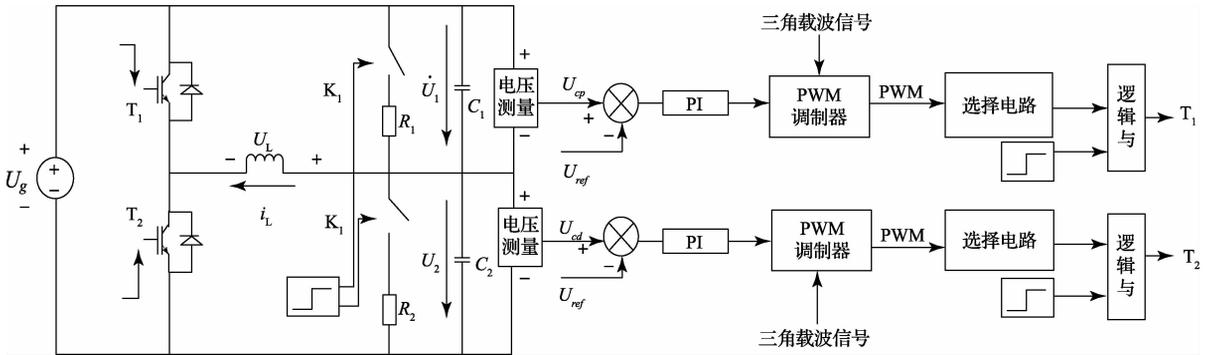


图 2 电压平衡器控制

由于 C_1 和 C_2 容量较大以及电感 L 的存在,启动瞬间会引起较大的冲击电流,电容两端会出现较大的输出过冲,这将损坏电容器和用电设备。为此,本文加入了初始电容充电过程,采用开关 K_1 、 K_2 延时控制器作用,待电容电压稳定接通 K_1 和 K_2 ,可以有效抑制开启电压。

4 仿真验证

为验证本文提出的电压平衡器的控制策略,在 MATLAB/SIMULINK 环境下,利用其仿真模块 powersystem,对图 3 所示的平衡电路进行仿真分析,其中触发脉冲分别控制上下两个 IGBT 开关管 T_1 和 T_2 的导通与关断。该系统容量为 15 kW,设上下两个电容容量均为 $4\ 700\ \mu\text{F}$,用于调整电压的平衡电感为 0.1H ,仿真电路其他器件参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

模块参数	数值
直流电压 U_g / V	400
参考电压 U_{ref} / V	200
平衡电容 $C / \mu\text{F}$	4000
平衡电感 L / H	0.1
上桥臂负载电阻 R_1 / Ω	4
下桥臂负载电阻 R_2 / Ω	8
IGBT/Diode 模块通态电阻 R_{on} / Ω	10^{-3}
IGBT/Diode 模块缓冲电阻 R_s / Ω	10^{-5}
IGBT/Diode 模块缓冲电容 C_s / F	Inf
仿真步长 T_s / s	1×10^{-6}
触发脉冲幅值/V	1
阶跃信号触发/S	0.5

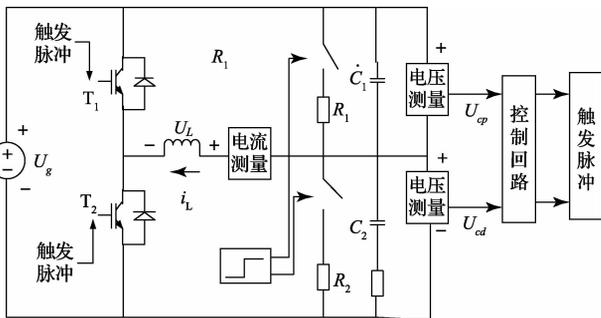


图 3 电压平衡器仿真电路

根据图 3 所示的仿真电路图,进行了 1 s 的仿真,0.5 s 时加入电压平衡控制。这样可以清楚的看到整个平衡过程中两个电阻及电容器两端电压的变化。仿真波形如图 4~6 所示,图 4 为未添加开关 K_1 和 K_2 情况下输出电压的波形,可以看出初始时刻电容电压上升至 260 V。对比图 5 中的电压值,电容电压在初始阶段平稳上升,0.5 s 处接通 K_1 和 K_2 后电压 U_{cd} 上升至 220 V,显著降低了开启电压。电路稳定时上下电容的输出电压趋于相同,电压偏差值不超过 $\pm 2\text{V}$ 。整个平衡过程较平稳,没有过压现象,稳定后的电压波动较小,电感电流在线性上升和下降,为较为理想的三角波。因此,采用本文的电压平衡电路控制方法能

很好地避免负荷对直流输出电压的影响,也能较好地改善平衡过程中能量的利用效率。

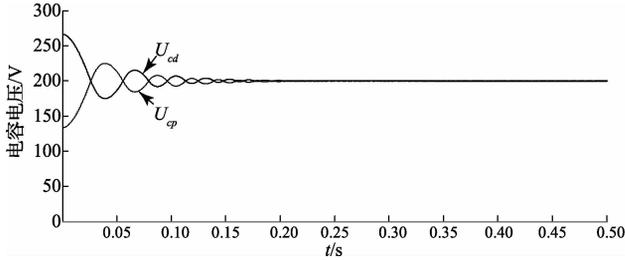


图4 电容电压波形

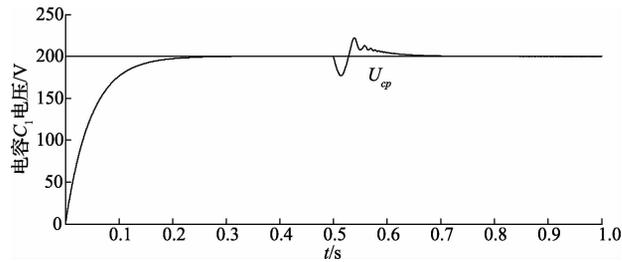


图5 电容电压波形

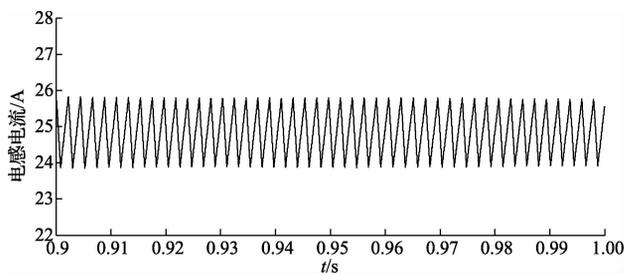


图6 电感电流波形

为再次验证电压平衡器的工作性能,假设在0.8s处引入负荷扰动,负载侧分别并联 6Ω 及 10Ω 电阻,经均压控制,输出电压在0.1s后达到稳定,且均在200V上下波动,波动范围在 $\pm 2\%$ 以内,仿真波形如图7所示。表明了电压平衡控制策略的有效性。

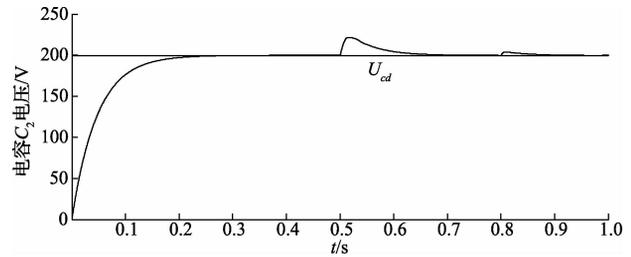
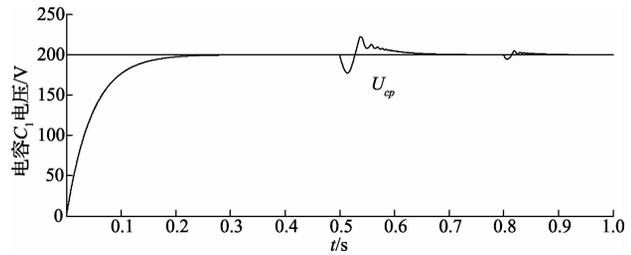


图7 电容电压波形

5 结 论

电压平衡器用于实现不平衡负荷下直流输出电压的平衡功能,消除负荷不平衡性对输出电压带来的影响。电容器平稳充电后,通过两个PI环节分别经PWM控制开关管 T_1 和 T_2 ,改变了占空比,达到快速稳定的效果。利用MATLAB电力系统仿真软件完成对电路平衡过程的仿真。仿真结果表明该电压平衡器有效消除了负荷的不平衡,实现了负荷电压平衡的功能,验证了理论分析的正确性及控制方法的可行性。

参考文献

- [1] 吴卫民,何远彬,耿攀,等.直流微网研究中的关键技术[J].电工技术学报,2012,27(1):98-106.
- [2] 王晓虹,艾芊.直流微电网在配电系统中的研究现状与前景[J].低压电器,2012,5:1-7.
- [3] 张国荣,王新兵,乔龙洋.直流微网中母线电压对直流负载影响[J].电气自动化,2013,35(2):65-67.
- [4] 胡存刚,王群京,严辉.三电平中点箝位型逆变器中点电压平衡和控制方法研究[J].电子测量与仪器学报,2009,23(6):74-81.
- [5] 刘冠男,张相军.基于超级电容储能双向DC/DC变换器控制模型分析[J].电力电子技术,2013,47(10):81-83.
- [6] 陈方.基于超级电容的双向DC/DC变换器研究[D].杭州:浙江大学,2012.

(下转第40页)