

微电网中超级电容器储能系统的仿真研究

叶玉凤 张会林 张志宇 徐 辉

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 超级电容器作为一种高功率型储能装置,其在微电网中是提高电能质量的重要组成部分。设计了微电网中超级电容器储能系统,在此基础上重点阐述了双向 DC/DC 变换器的拓扑结构、工作原理以及双重移相脉冲下电压外环电流内环的双闭环控制策略。最后在 Simulink/MATLAB 平台实验验证了在该控制策略下储能系统能够很好的维持直流侧母线电压和网侧电流的稳定性。

关键词: 微电网;储能系统;超级电容器;双向 DC/DC

中图分类号: TM711; TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Simulation study on super capacitor energy storage system in microgrid

Ye Yufeng Zhang Huilin Zhang Zhiyu Xu Hui

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: As a kind of high power type energy storage device, supercapacitor is an important part of improving the power quality in microgrid. In this paper, the topology, working principle and double closed loop control strategy of double phase DC/DC converter inner voltage loop under double phase shifted pulse are discussed. Finally, the simulation results on Simulink/MATLAB show that the energy storage system can maintain the stability of DC bus voltage and grid side current under the control strategy.

Keywords: microgrid; energy storage system; super capacitor; bidirectional DC/DC

1 引言

在新能源革命的背景下,电网的重要性日益突出,随着发展电网将成为重要的能源配备和输送网络。近年来,日本、美国、欧盟等各个国家都相继展开了微电网试验示范工程的研究^[1-2]。微电网是指由分布式电源、能量储存装置、负荷、监控和保护装置等汇集而成的小型发配电系统,是一个能够实现自我控制和管理的自治系统^[3-5]。由于超级电容器具有循环寿命长、功率密度大、组装方式简单、充放电循环寿命长等特点,使其成为微电网分布式储能系统中的一种重要的储能装置^[6]。由于储能技术是一种新兴的极具潜力的新兴技术,世界各国已经纷纷将其提升到国家战略地位。目前利用多孔碳气凝胶作为超级电容器的电极材料的研究备受学者们的青睐。

在一般传统的单向 DC/DC 功率变换器中能量只能单向传递,这就制约了储能装置的研究与发展。随着国内外学者对功率变换器件的不断研究,相继推动了双向 DC/DC 变换器的发展与进步^[7-10]。微电网中双向 DC/DC 变换器承担着直流母线与储能单元之间的能量传递任务,因此对

其控制策略的研究至关重要^[11-12]。

本文通过双重移相方法控制双向 DC/DC 变换器,针对超级电容放电工作情况下的电压电流双闭环控制策略来实现储能元件与电网之间的能量变换建立模型,通过实验分析验证储能系统及控制策略的正确性和有效性。

2 超级电容器系统的建模

由于超级电容器的双层电化学结构使其工作原理与普通电容差别很大。从结构上看,超级电容器主要由极化电极、集电极、电解质、隔膜和封装等几部分组成。各部分的组成、结构均对其性能产生重要的影响,所以超级电容器需要用复杂的电阻和非线性电容构成的网络来描述,其经典的物理等效模型如图 1 所示。

图 1 中 C 是理想电容,表示超级电容的容量; R_{ESR} 是等效串联电阻它不仅表征超级电容器内部的发热损耗,而且在向负载放电时随着放电电流的大小变化其将引起不同的压降,同时对最大放电电流也有一定的约束作用; R_{EPR} 作为等效并联电阻,也称为漏电阻,表征超级电容的漏电流效应,是影响超级电容器长期储能的重要参数; L 是等效串联

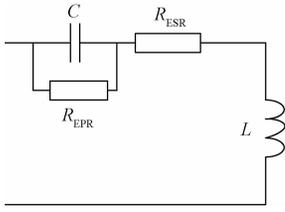


图1 超级电容经典等效 RC 模型

电感。当超级电容器通过功率变换器与网络连接时处于较快的循环充放电过程中时, R_{EPR} 的影响可以忽略。

充放电时, 超级电容端电压与理想电容电压为:

$$U = U_c \pm IR \quad (1)$$

$$U_c = U_0 \pm \frac{1}{C} \int_0^t (I - I_L) dt \quad (2)$$

式中: I 是放电电流; I_L 是漏电流; t 是充电时间; U_0 是放电开始前电容两端的电压。

荷电状态 SOC_c 表示超级电容器正常工作时储存电能的量。计算公式如下:

$$SOC_c = \frac{Q}{Q_c} = \frac{(U_c - U_{min})C}{(U_{max} - U_{min})C} \\ = \frac{U_c - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \quad (3)$$

式中: U_{max} 、 U_{min} 分别代表最高、最低工作电压; Q 代表超级电容器剩余电量; Q_c 代表超级电容器额定容量。

本文中的超级电容模块是通过多个经典等效模型单体串联而成的。

3 双向 DC/DC 变换器

作为超级电容器与网侧变流器接口的双向 DC/DC 变换器, 在电网中起到传递能量的作用^[13-14]。本文通过双重移相脉冲来控制变换器中的电力电子开关管, 从而实现功率的双向流动, 进行能量的存储和释放, 稳定直流侧母线电压, 降低直流侧电流波动, 进而提高系统的稳定性。

3.1 拓扑结构

图2所示为双向 DC/DC 变换电路, 其中主电路由高压侧全桥电路, 外串电感、高频变压器和低压侧全桥电路组成, VT1~VT8 为 IGBT 功率器件。

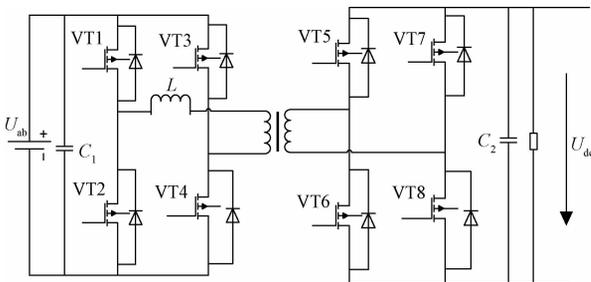


图2 双向 DC/DC 变换器电路拓扑

3.2 工作原理

本文采用双重移相控制脉冲来控制各个开关管的导通状态。VT1、VT2 驱动波形互补, VT3、VT4 驱动波形互补, 且 VT1 和 VT3 驱动信号超前于 VT2 和 VT4 的驱动信号, 具体的驱动信号时序如图3所示。其中, S1~S4 分别为 VT1~VT4 开关管的驱动脉冲, S5、S8 为开关管 VT5、VT8 开关管的脉冲, S6、S7 为 VT6、VT7 开关管的脉冲。通过控制输出电压的相角就可以实现对电感 L 两端电压的控制, 从而达到控制变换器功率流向和大小的目的。

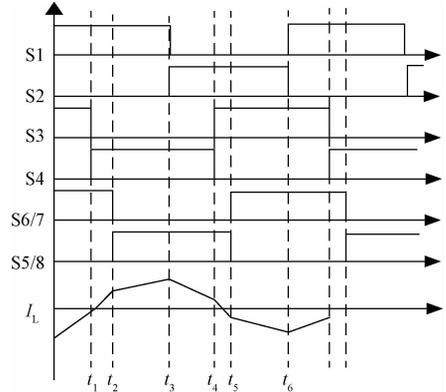


图3 双重移相控制脉冲

通过分析可知在双重移相脉冲控制下双向 DC/DC 变换器大致分为五种不同的工作方式:

工作模式 1: t_0 时刻前 VT2、VT3 导通, 电感电流为负, 而后 $t_0 \sim t_1$ 时间段 VT2 关断 VT1 和 VT3 导通, 由于电感电流方向无法突变, 所以此时原边电流经过 VT3-N1-L-D1 续流(此时电感并没有给高压侧电源放电)。低压侧 VT6/7 导通, 上述电路副边电流流经 D6-N2-D7-C2 给低压侧负载供电, 电感电流逐渐减小。

工作模式 2: $t_1 \sim t_2$ 时间段高压侧全桥的 VT3 关断 VT4 导通。若此时电感电流方向仍未改变, 则原边电流经过 D1-C1-D4-N1-L 续流, 另一侧, VT6/7 仍然导通, 电流仍通过 D6-N2-D7-C2 给低压侧负载供电, 此时电感给高压侧电压放电。当电感电流降为 0, 方向由正到负时, 原边电流通过 VT1-L-N1-VT4, 副边电流通方向仍保持不变。

工作模式 3: $t_2 \sim t_3$ 时间段, 此时高压侧全桥功率管的导通状态和上一状态一样, 而低压侧全桥 VT6/7 截止 VT5/8 导通, 副边电流通过 N2-D5-C2-D8 给负载供电。

工作模式 4: $t_3 \sim t_4$ 时间段, 当高压侧全桥功率管的 VT1 关断, VT2 导通时原边电流通过 L-N1-VT4-D2 构成闭合回路。低压侧全桥的流通状态同模式 3 一样, 持续给低压侧负载供电。

工作模式 5: $t_4 \sim t_5$ 时间段, 高压侧开关管 VT4 关断, VT3 导通。若此时电感电流仍为正, 则原边电流通过 C1-

D2-L-N1-D3 构成回路高压侧给 L 充电。此时低压侧全桥开关管仍是 VT5/8 导通状态。随着时间的进行直到电感电流降为 0, 此时电流方向由正变为负, 原边电流通过 VT3-N1-L-VT2 构成回路, 副边电流流通状态不变。

3.3 控制策略及建模

双向 DC/DC 变换器的控制采用电压外环, 电流内环双闭环控制方式, 与网侧变流器相连的输出电压作为双重

移向脉冲电压外环的反馈, 与给定的电压差值形成误差信号作为 PI 控制器的输入; 同时 PI 控制器的输出与给定电流进行比较, 作为双重移相脉冲产生的 PI 控制器的输入; 电流环给定电流与电感电流反馈的差值形成误差信号作为电流环 PI 补偿控制器的输入, 经过 PI 调节改变移相角的大小, 控制双重移相脉冲发生器产生脉冲, 进而控制 DC/DC 变换器开关器件的通断。据此给出控制框图, 如图 4 所示。

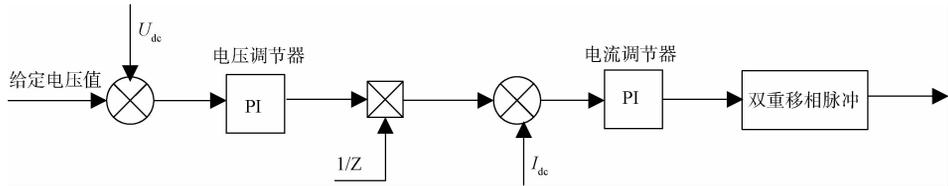


图 4 PI 控制框图

4 实验结果及分析

4.1 双向 DC/DC 变换器的实验分析

根据分析在 MATLAB/Simulink 仿真平台中按照图 2 的拓扑图搭建出由双重移相脉冲控制的双向 DC/DC 变换

器实验模型。如图 5 所示, 按照降压工作模式去进行电路参数的设计, 其中开关管的频率 $f = 10 \text{ kHz}$ 、高压侧电压 $V = 400 \text{ V}$ 、电容 $C_1 = 5 \times 10^{-3} \text{ F}$ 、电阻 $R_1 = 10 \text{ }\Omega$ 、变压器储能电感 $L = 12 \times 10^{-6} \text{ H}$ 、变压器匝数比 $N = 8$ 、低压侧电阻 $R_2 = 50 \times 10^4 \text{ }\Omega$ 、电容 $C_2 = 4 \text{ F}$ 。

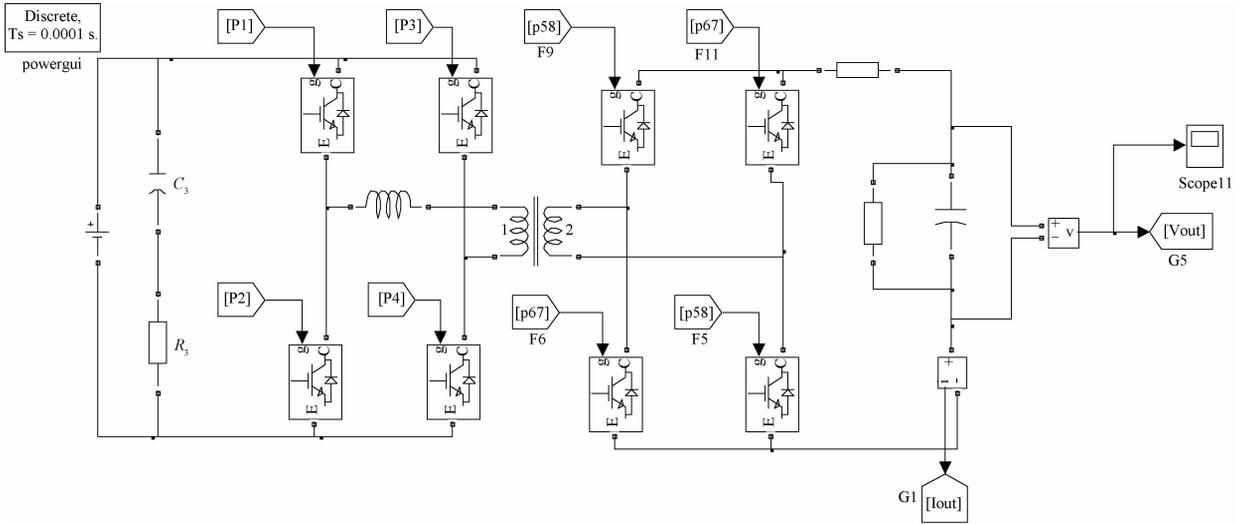


图 5 双向 DC/DC 系统实验仿真

图 6 所示为双重移相控制的实验原理图, 共有 3 个部分组成, 脉冲信号发生器、移相脉冲控制器、延时模块。实验仿真脉冲信号发生器的频率为 10 kHz , 占空比为 50% 。

如图 7 所示即双向全桥全桥 DC/DC 变换器的双重移相控制脉冲。

图 8 所示为双重移相控制下输出电压的波形, 可以看出双向全桥 DC/DC 变换器能在短时间内使输出电压稳定在 50 V 。

4.2 超级电容器储能系统的实验分析

为了研究本文提出的超级电容器的储能系统以及双

重移相脉冲控制策略的准确性和有效性, 根据以上分析在 MATLAB/Simulink 平台上搭建了超级电容器储能系统实验模型(图 9)。该仿真模型由超级电容器组、双向 DC/DC 变换器以及网侧变流器等组成。

实验中把直流母线的电压控制在 700 V , 直流母线电压如图 10 所示, 可以很清楚的看到在双重移相脉冲控制下双向 DC/DC 变换器直流侧母线电压基本保持稳定。

为了进一步验证储能系统的稳定性, 本文对网侧 A 相电流进行了快速傅里叶变换(FFT)分析, 如图 11 所示。

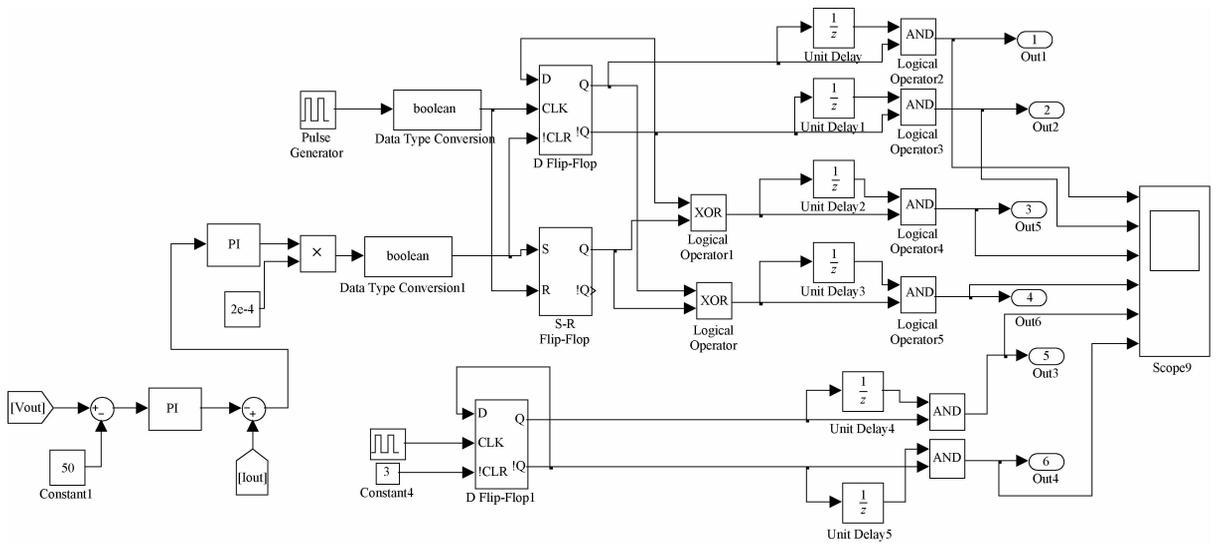


图6 移相脉冲实验仿真原理

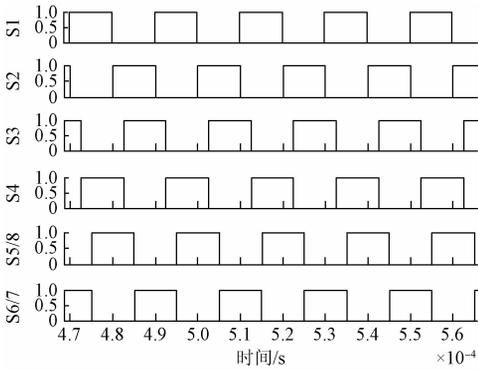


图7 双重移相控制脉冲

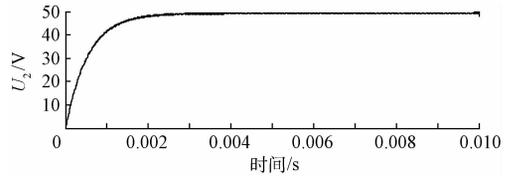


图8 双向DC/DC变换器低压侧输出波形

通过图12的FFT分析结果可以看出网侧电流谐波畸变率只有1.61%，谐波含量极少，远低于国家5%的质量要求，谐波污染小，电能质量稳定。

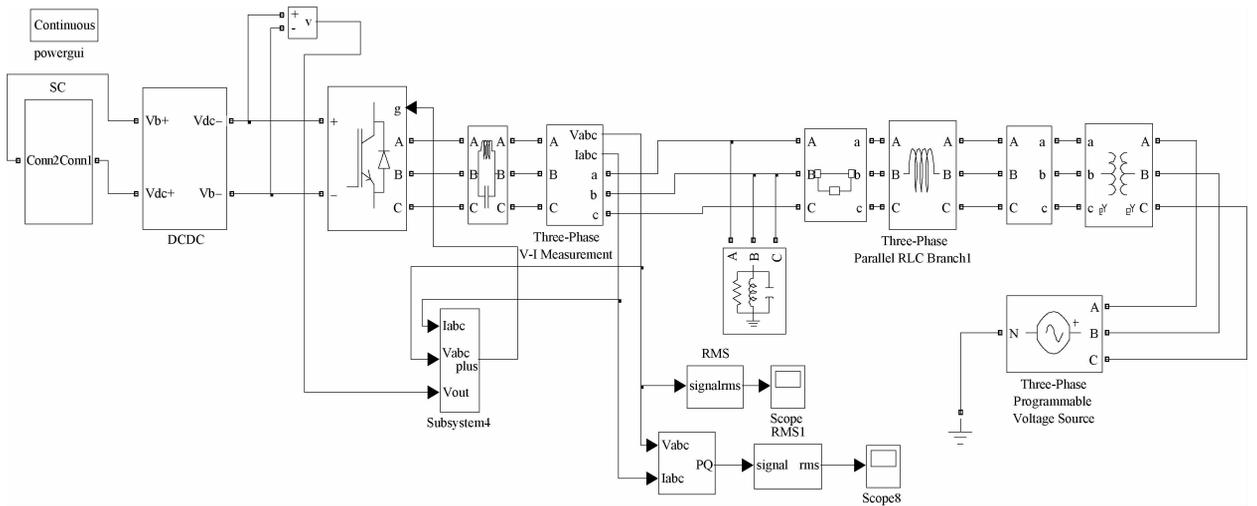


图9 超级电容器储能系统实验仿真

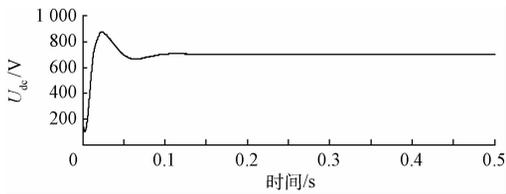


图 10 直流母线电压曲线

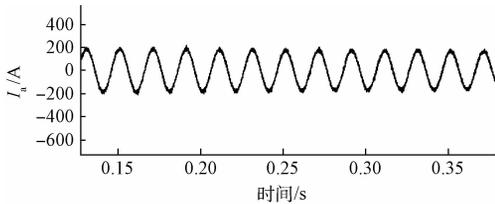


图 11 网侧 A 相电流波形

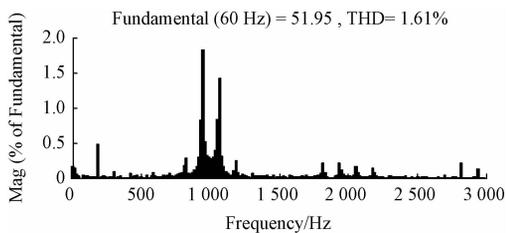


图 12 网侧电流 FFT 分析

5 结 论

本文详细分析了基于超级电容器的双重移相脉冲控制下的双向 DC/DC 变换器的各个阶段的工作原理,进而提出了双重移相控制下的电压、电流双闭环的控制策略,并分别建立了双向 DC/DC 变换器和超级电容器储能系统实验模型。

经实验验证,超级电容器储能系统组合双向 DC/DC 变换器在并网过程中能够很好的稳定直流侧母线电压,且在该系统下网侧电流畸变率只有 1.61%,保证了网侧电压的稳定以及用户的用电安全。由此验证超级电容器储能系统在微电网中的实用性和有效性。

参考文献

[1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-103.

- [2] 李建林,田立亭.能源互联网背景下的电力储能技术展望[J].电力系统自动化,2015,39(23):15-22.
- [3] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-59.
- [4] 杨洋,谭久俞.含超级电容器的混合储能技术在微电网中的应用[J].电气开关,2016,15(3):97-99.
- [5] 张会强,王宇拓,王林川,等.基于超级电容器的混合储能在直流微电网中的应用[J].电测与仪表,2015,52(22):31-35.
- [6] 于会群,钟永,张浩,等.微电网混合储能系统控制策略研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(5):730-737.
- [7] 周二雄,李凤婷,朱贺.微电网的建模仿真研究[J].计算机仿真,2013,30(6):134-137.
- [8] CHEN W, RONG P, LU Z. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(9): 3075-3086.
- [9] 李安寿,张东来,杨扬.开关变换器的稳定性定义及分析方法[J].电力电子技术,2013,18(25):102-105.
- [10] 史永胜,史耀华,张普雷.一种新型高精度数字 DC-DC 变换器控制方法研究[J].计算机测量与控制,2010,18(4):841-847.
- [11] 吴祎,王友仁,姜媛媛,等.基于特征参数退化的 DC/DC 变换器故障预测[J].仪器仪表学报,2013,34(6):1381-1385.
- [12] 张国驹,唐西胜,周龙,等.基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(6):15-22.
- [13] 郑晓庆,杨日杰,杨立永,等.多路输出 DC-DC 电路设计[J].国外电子测量技术,2012,31(9):31-33.
- [14] 刘喜梅,贺瑞,张鹏.直流微电网电压平衡器的控制策略[J].电子测量技术,2015,38(10):32-39.

作者简介

叶玉凤,硕士研究生,研究方向为超级电容器储能系统。

E-mail: yeyfusst@126.com