

并网型储能系统充放电仿真分析

徐新泉 徐立亮 胡仁祥 张毅 王明慧 赵亚楠
(国网吐鲁番供电公司 新疆 吐鲁番 838000)

摘要: 储能系统被广泛应用于风电、光伏等间歇性新能源发电中平抑出力波动。针对新能源系统充放电对储能系统控制单元稳定运行的要求,搭建了一种基于 DC/AC 变换器和双向半桥 DC/DC 变换器的控制系统。首先采用状态空间法建立了储能系统充放电控制的数学模型,然后基于此数学模型,详细分析了该控制器的工作原理及电流闭环反馈的控制方法,最后在 Matlab 仿真系统中验证了理论分析的正确性。

关键词: 储能系统; 闭环反馈控制; 状态空间法

Abstract: Energy storage systems are widely used in power generation by the intermittent new energy sources such as wind power, photovoltaic etc to smooth the output fluctuations. Aiming at the requirements for stable operation of control unit in energy storage system by the charging and discharging of new energy system, the control system based on DC/AC converter and two-way half bridge DC/DC converter is proposed. The mathematical model to control charging and discharging of energy storage is established with state space method. And then the working principle of the controller and the control method of current closed-loop feedback are analyzed in detail based on the proposed mathematical model. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified in Matlab simulation.

Key words: energy storage system; closed-loop feedback control; state space method

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0084-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.020

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展以及风电等间歇性能源大力并网的需求,储能系统以其较强的灵活性等优点逐渐被应用到电力系统中。随着储能技术的不断成熟,大规模的风电、光伏等清洁能源完成了友好并网。目前储能系统主要可以通过以下两种方式接入电网中: 1) 直接通过双向 AC/DC 变换器接入电网; 2) 通过 AC/DC 和双向 DC/DC 两级变换器接入电网^[1-2]。文献 [3-5] 采用状态空间平均法建立了超导储能系统用斩波器充放电的数学模型,并搭建了试验系统,但没有考虑充放电时交流侧功率因数的变化,在实际运用中有一定的局限性。下面将结合充放电时交流侧功率因数的变化情况,进行储能系统的充放电控制研究。

储能系统通过能量转换系统(power conversion system, PCS) 接入到配电网中, PCS 可以实现电网与储能系统之间的能量转换,从而达到储能系统充放电的目的。下面对能量转换系统进行了研究,

分析了基于储能系统的斩波器充、放电的基本工作原理,建立了斩波器的数学模型,并设计了电流闭环控制策略。

1 储能系统拓扑结构图

将储能系统和 PCS 通过组合可以控制储能系统的充放电。该控制系统由变流器和两相限斩波器组成。储能系统接入电网结构图如图 1 所示^[4],图中 U_a 、 U_b 、 U_c 分别是电网三相电压, VSC 由交替导通的 6 个桥臂管构成,斩波器由 2 个 IGBT 管构成。

1.1 DC/AC 变流器

在储能系统中 DC/AC 变流器采用三相电压型 PWM 模型,其拓扑结构如图 2 所示。通过 PWM 在逆变与整流两种工作状态之间的切换实现储能系统的充放电。当变流器工作在逆变状态时,储能系统向电网提供能量;变流器工作于整流状态时,储能系统从电网吸收能量。对于 DC/AC 变流器采用外环电压内环电流的双闭环控制模式,外环电压控制环主要用于直流电压的控制,内环电流环对电流变化

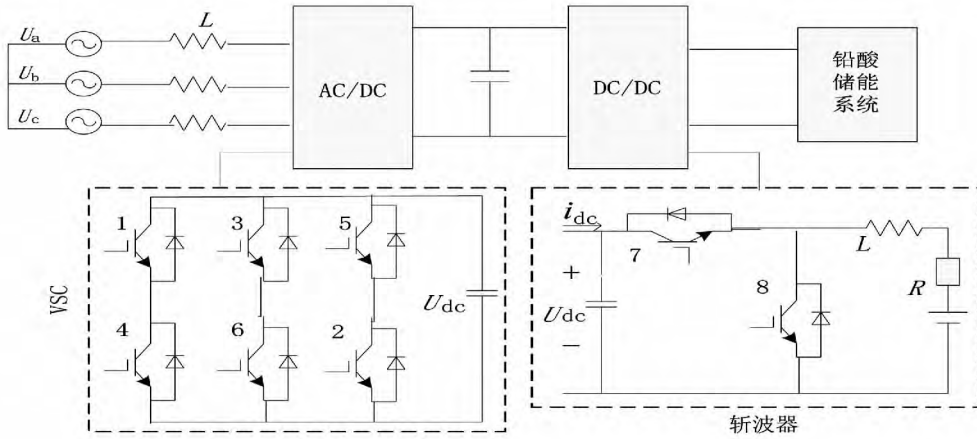


图 1 储能系统接入电网结构图

值进行快速的跟踪控制^[5]。

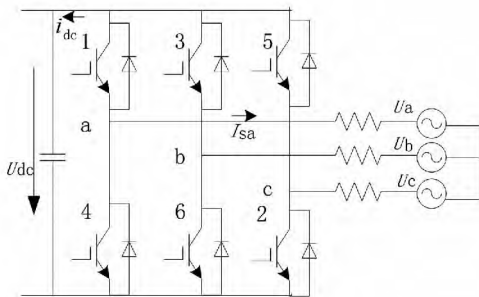


图 2 AC/DC 变换器图

根据电路学原理可以推导出 VSR 在三相静止坐标系下的数学模型,通过坐标转换的原理可以等效出 VSR 在 dq 坐标下变流器的数学模型,这样省去了考虑频率变化的麻烦。dq 坐标下变流器的数学模型可以用式(1)表示:

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + V_d \\ u_q = L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + V_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_d 、 U_q 是电网电动势的 d、q 轴分量; V_d 、 V_q 是三相 VSR 交流侧电压的 d、q 轴分量。

从式(1)可以看出, d、q 分量之间并没有解耦,为了便于控制器模型的搭建,此处采用前馈解耦的控制方法使得 d、q 分量之间达到解耦的目的。当电流环节采用 PI 调节器之后, V_d 、 V_q 解耦之后的关系式可以用式(2)表示^[6]:

$$\begin{cases} V_q = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{q-ref} - i_q) + Li_d + u_q \\ V_d = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_{d-ref} - i_d) + \omega Li_q + u_d \end{cases} \quad (2)$$

经过式(2)可以看出, d、q 分量之间达到了解耦

控制,由式(2)可以得到电流内环的控制策略如图 3 所示。

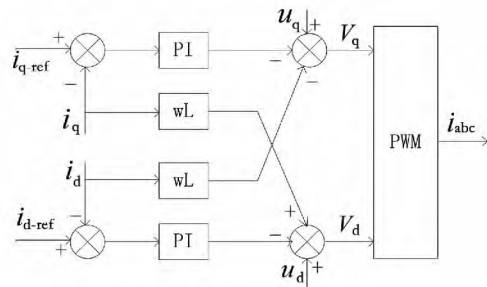


图 3 电流内环解耦控制图

1.2 斩波电路

当斩波器对储能系统进行充放电时, PWM 变流器控制直流环节的电容电压处于稳定运行状态^[7-8]。当 VT7 导通, VT8 关断时,斩波器处于 Buck 状态对储能系统充电;当 VT7 关断, VT8 导通时,斩波器处于 Boost 状态对储能系统开始放电。

充电状态时的数学模型如式(3)所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_l}{dt} = -i_l R - u + u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_l \end{cases} \quad (3)$$

放电状态时的数学模型如式图(4)所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_l}{dt} = -i_l R - u - u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} + i_l \end{cases} \quad (4)$$

DC/DC 变换部分采用双向 DC/DC 变换器,实现储能系统的充放电。当储能系统电量不足时,通过控制 DC/DC 变换器使得系统处于充电运行状态。在充电状态时, DC/DC 变换器中 VT7 和 D8 构成回

路, 变换器处于 Buck 运行状态; 放电状态时, DC/DC 变换器中 VT8 和 D7 构成回路, 变换器处于 Boost 运行状态。在变流器工作的过程中, 通过 PWM 控制 IGBT 的触发信号可以调节变换过程中的电流与电压, 使其达到系统所需值。斩波电路的控制系统如图 4 所示^[9-10], 图中, PWM 开关频率为 2 000 Hz, PI 控制器的参数为: $K_p = 0.16$; $K_i = 9.35$ 。

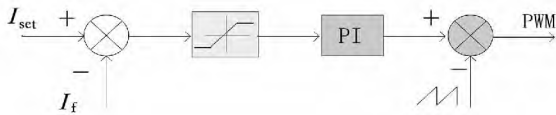


图 4 斩波电路控制图

在储能系统的充放电过程中, 采用电流闭环的控制模式。通过电流给定值与反馈值的差值经过 PI 控制器计算斩波器的占空比, 利用电流反馈值控制 VT7 和 VT8 交替导通, 从而控制储能系统的充放电。

2 仿真验证

为了验证变换器设计的准确性, 在 Matlab 软件中搭建了储能系统的充放电仿真模型, 网测电压为 380 V, 电路频率取为 50 Hz。为了简化模型的搭建, 储能系统采用电压源与电阻的串联体代替。图 5 是储能系统充放电的仿真模型图。

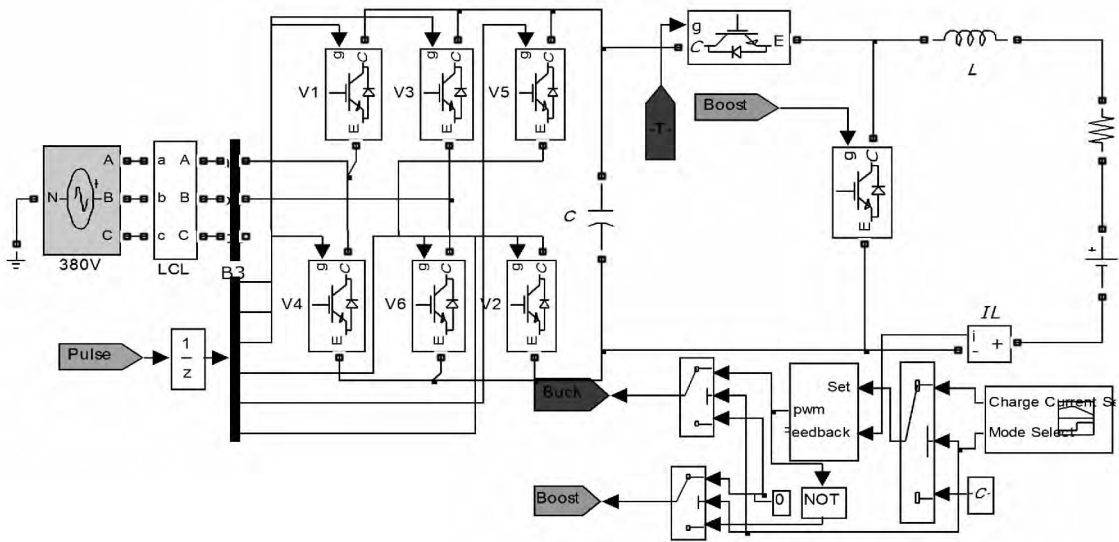


图 5 储能系统充放电模型

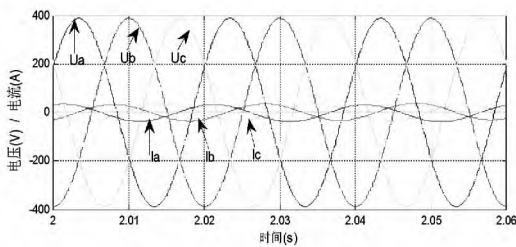


图 6 充电时网测功率因数图

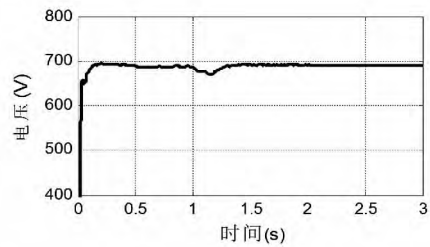


图 7 负载变化时直流母线电压波形

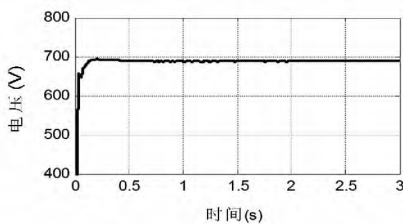


图 8 储能系统放电时直流母线电压波形

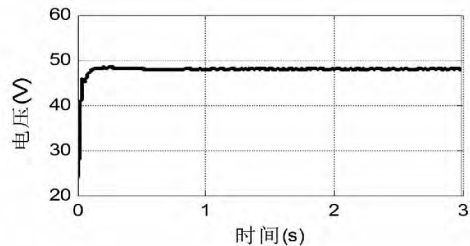


图 9 储能系统充电时直流母线电压波形

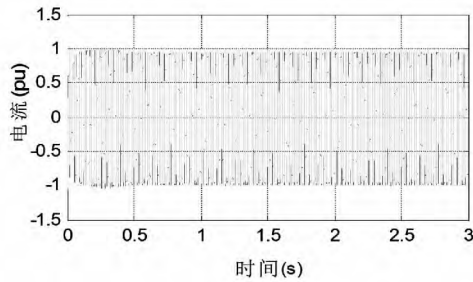


图 10 负载恒定时交流侧电流波形

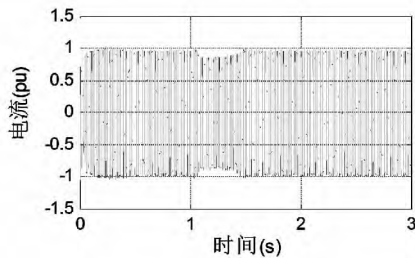


图 11 负载变化时交流侧电流波形

图 6 是储能系统充电时整流器侧电流、电压波形,可见二者相位基本一致,满足网侧功率因数为 1 的要求,并网电流达到了快速跟踪电压变化的效果,且电流正弦度较好。图 7 是储能系统放电过程中负载发生时,直流母线电压波动图。从图 7 可以看出充放电模型可以稳定直流母线电压的稳定性,从而可以实现储能系统的正常充放电。图 8 是储能系统处于放电状态时的直流母线电压波形图,从图 8 可以看出放电电压可以很快达到直流母线电压 690 V,并且可以稳定在此值,电压波动范围小,从而提高了储能系统的使用寿命。图 9 是储能系统处于充电状态时的直流母线电压波形图,从充电波形图可以看出,储能系统可以通过双向 DC/DC 变换器快速充电,在瞬间就可以达到其充电电压,且电压波动范围较小,从而提高了系统的可靠性。图 10 是负载恒定时交流侧电流数值变化波形,图 11 是负载变化时交流侧电流变化波形图,由图 11 可以看出,在负荷发生波动时,交流侧的电流值也会发生响应的变化。

3 结 论

提出了基于能量转换系统的储能系统充放电控

制策略,分析了 DC/AC 变流器、直流斩波电路的基本原理,并建立了其数学模型及提出了电流闭环反馈控制方法。仿真结果表明:能量转换系统可以实现储能系统的充放电,保证充放电实现了单位功率因数运行,网侧电流正弦化。从充放电电压波形图可以看出:储能系统充放电响应速度很快,且超调量较小,从而证明了充放电控制策略具有较好的动态性能,为储能系统充放电提供了稳定、可靠的电源。

参考文献

- [1] 张耀,陈息坤,杨胜. 锂电池化成双向 AC/DC 变换器研究[J]. 电工电能新技术,2014(8):32-37.
- [2] 刘月贤,王天钰,杨亚宇,等. 电动汽车充放电系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(13):70-76.
- [3] 杨斌,诸嘉慧,郭云峥,等. 高温超导磁储能用斩波器仿真及试验[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):51-54.
- [4] 李辉,季海婷,付博,等. 含 DC/DC 变换器全钒液流电池储能系统安全充放电策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(24):7-11.
- [5] 李武峰,罗小英,边孝成,等. 电动汽车蓄电池充放电装置研究[J]. 电力电子技术,2013,47(8):89-91.
- [6] 张兴,张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [7] 李永东. 现代电力电子学——原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [8] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [9] 高雪松,张相军. 基于超级电容的双向 DC-DC 变换器软开关控制分析[J]. 电气传动,2013(s1):82-86.
- [10] 郭熠. 电动汽车双向 DC/DC 变换器的研究[D]. 天津:天津大学,2004.

作者简介:

徐立亮(1990),硕士研究生,从事电网运行工作。

(收稿日期:2015-11-09)

欢迎订阅 欢迎投稿