

分布式发电中的储能变换器暂态电流控制研究

张洪阳^{1,4}, 张志锋², 时振堂¹, 侯院军³, 李卫东⁴

(1. 中国石化大连(抚顺)石油化工研究院, 辽宁 大连 116045;

2. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 3. 上海

大周信息科技有限公司, 上海 200233; 4. 大连理工

大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:随着分布式发电系统和能源互联网技术的迅速发展,作为分布式发电组网重要环节之一的储能系统显得越发重要,在直流环节实现储能系统接入,可以灵活构成直流支撑母线或直流微电网,实现系统的离/并网运行。以储能变换器为研究对象,以负载电流瞬时值和并网点母线电压暂态变量为参考,提出了双向DC/DC变换器电流补偿控制方法,并对共母线组网的多台储能DC/DC变换器按照母线电压变化趋势进行设备自动组网和解列,避免直流微电网系统失稳。最后通过实验验证,证明了理论和分析的正确性。

关键词:分布式发电;储能变换器;直流微电网;瞬时电流补偿控制

中图分类号:TM76 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19222

Research on Transient Current Control of Distributed Generation Energy Storage Converter

ZHANG Hongyang^{1,4}, ZHANG Zhifeng², SHI Zhentang¹, HOU Yuanjun³, LI Weidong⁴

(1. SINOPEC Dalian(Fushun)Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Dalian 116045, Liaoning,

China; 2. College of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang

110810, Liaoning, China; 3. Shanghai Dazhou InfoTech Ltd. Department of Technology,

Shanghai 200223, China; 4. College of Electrical Engineering, Dalian

University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: With the rapid development of distributed generation system and energy Internet technology, the energy storage system as one of the important links of the network is becoming more and more important. To realize the access of energy storage system in the direct-current(DC)link, it can flexibly form the DC support bus or DC micro-grid, and realize the system off/grid network operation. The DC/DC converter was researched with transient current compensation control, and the bidirectional DC/DC converter was designed with the references of the current and bus voltage transient values, and the multiple energy storage DC/DC converter of the common bus network was based on the bus route. The equipment can be automatically assembled and disassembled to avoid DC micro-grid instability. Finally, the correctness of the theory and analysis are verified with experimental verification.

Key words: distributed generation; energy storage converter; direct-current micro-grid; transient current compensation control

能源互联网最大程度地促进了不同类型的
一、二次能源互联、互通和互补,灵活地支持各种
新能源、分布式能源的大规模接入,实现用电设备
的即插即用,储能技术和多能源控制技术是能源
互联网建设的关键技术之一^[1-3]。文献[4]通过
模拟不同的负荷扰动研究了利用大规模储能电

源取代发电厂进行调频的控制效果;文献[5]总
结了交直流混合配电系统中的交直流互联变换
器控制、交流子网内部协调控制、直流子网内部
协调控制以及交直流网络间的协调控制策略;对
于含有储能的分布式电源系统故障则从等效负
荷的配电网模型、时空关联特性解析与建模,以

基金项目:国家自然科学基金项目(61603263);中国石化集团公司资助项目(317018)

作者简介:张洪阳(1982-),男,博士,中级工程师,Email:pmsm@163.com

及孤岛控制等方面进行了研究^[6-9]。

对储能变换器方面的研究主要集中在了硬件设计和控制方法2个方面,DC/DC变换器是实现系统离网和直流支撑的重要组成部分。直流微电网的稳定性问题文献[10]中进行了研究,而文献[11]则通过跟踪微分器对暂态条件下系统不平衡功率进行跟踪,并将跟踪信号引入储能单元的控制环节,使储能单元能够直接对系统的不平衡功率进行调节,以改善其对直流母线电压波动的抑制效果;文献[12]分析了Z源型DC/DC变换器的PWM控制问题;文献[13]建立了直流微电网大信号数学模型,并根据李雅普诺夫稳定判据提出了小扰动时直流微电网稳定性的判定条件。文献[14]建立了Boost-Buck电路的状态空间方程,并设计了双并联双向Boost-Buck电路的闭环控制策略,通过仿真验证了对电压的控制性能;文献[15]建立了双向直流变换器的系统模型,并构造系统的李雅普诺夫函数进行切换控制律的分析。另外,根据控制器选择的不同,文献[16]介绍基于PI控制器以及准PR控制器的控制策略,并进行了仿真分析。对于储能DC/DC变换器的控制以及组网和解列技术方面的研究主要围绕在系统容量、能量路由器等系统层面,文献[17]以装机容量、微网功率平衡、储能装置充放电平衡及深度等要求为约束条件,论证优化模型为线性规划,并选择LINGO软件求解,得出不同类型微网配置分布式发电和储能容量对应的控制策略;文献[18]将分布式电源的能源路由器划分为核心控制通信和能量传输部分,并构建直流交流双母线动态互动的方式来实现供电的高效和稳定。

以上研究并未重点讨论同一系统下的不同储能单元的暂态电流和母线电压特点以及储能变换器自身的并网/解列问题,针对以上问题,本文着眼分布式发电系统中同时包括多种规格的电池、超级电容等储能单元,以及多台DC/DC变换器的应用工况,由于储能单元和DC/DC变换器在自身特性、容量,以及输电线路等多方面的差异,导致系统容易出现母线震荡和稳定性降低等问题,本文以负载电流瞬时值和并网点母线电压暂态变量为参考,提出了双向DC/DC变换器的暂态电流补偿控制,并对共母线组网的多台储能DC/DC变换器按照母线趋势进行设备自动组网和解列,避免直流微电网系统失稳。最后搭建了

含有超级电容器组、锂电池组、DC/DC变换器的直流微电网实验平台,实验结果验证了理论和分析的正确性。

1 储能变换器电流补偿控制

储能DC/DC变换器能够实现能量的双向流动,通过控制开关器件的占空比实现电压和电流的控制。本文选用非隔离型双向DC/DC变换器,其拓扑结构如图1所示。其中 Q_1 和 Q_2 选用全控开关器件IGBT,并且 Q_1 和 Q_2 驱动信号互补; D_1 和 D_2 为反并联二极管器件; R_{G1} 和 C_{G1} 构成 G_1 管的吸收电路; R_{G2} 和 C_{G2} 构成 G_2 管的吸收电路; C_1 和 C_2 是直流侧滤波电容; L 是功率电感。该拓扑结构简单,效率较高,同时扩展后易于构成多重的复合拓扑结构。

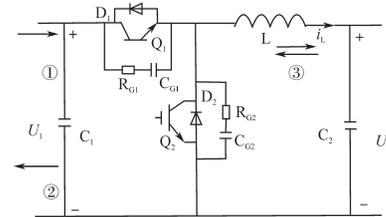


图1 拓扑结构

Fig.1 Topological construction

根据双向工作原理可以实现以下3种工作模式:①能量由 U_1 流向 U_2 ;②能量由 U_2 流向 U_1 ;③能量交替工作。负载电流波形如图2所示。

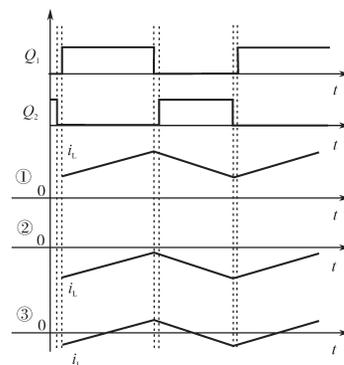


图2 负载电流波形

Fig.2 Current waveforms of load

对于共母线的直流微电网而言,储能DC/DC变换器直流侧电容暂态表征如下:

$$\begin{cases} C_1[U_{dc1}(k) - U_{dc1}(k-1)] = \Delta I_1 T_1 \\ C_2[U_{dc2}(m) - U_{dc2}(m-1)] = \Delta I_2 T_2 \\ \vdots \\ C_p[U_{dcp}(n) - U_{dc1}(n-1)] = \Delta I_p T_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_1 、 C_2 和 C_p 分别为变换器1,变换器2和变

换器 p 的直流侧电容; $U_{dc1}(k), U_{dc1}(k-1), U_{dc2}(m), U_{dc2}(m-1), U_{dcp}(n), U_{dcp}(n-1)$ 为直流电压 k, m 和 n 时刻的值; k, m 和 n 分别为变换器1, 2和 p 的开关时刻; T_1, T_2 和 T_p 分别为变换器1, 2和 p 的开关周期; $\Delta I_1, \Delta I_2$ 和 ΔI_p 分别为变换器1, 2和 p 的直流母线电流变化量。由式(1)可得:

$$\begin{cases} \Delta I_1 = C_1[U_{dc1}(k) - U_{dc1}(k-1)]/T_1 \\ \Delta I_2 = C_2[U_{dc2}(m) - U_{dc2}(m-1)]/T_2 \\ \vdots \\ \Delta I_p = C_p[U_{dcN}(n) - U_{dc1}(n-1)]/T_p \end{cases} \quad (2)$$

可以根据 $\Delta I_1, \Delta I_2$ 和 ΔI_p 的变化情况判断对母线冲击的大小, 并作为电流补偿量直接作用于电流控制。假设以 U_2 为控制目标, 其瞬时电流补偿控制如图3所示, 采用电压/电流双闭环控制系统, 其中 Δi_c 为变换器直流侧并联电容带来的暂态电流变化量, 取反后与电流参考值相加作为电流控制器输入; $D_{Q1}/\overline{D_{Q2}}$ 为功率器件占空比, 该补偿方案引入了直流侧电容参与控制环节, 通过双向DC/DC变换器降低并网点变换器动作带来的冲击, 同时也实现了对电流环的快速跟踪和响应。

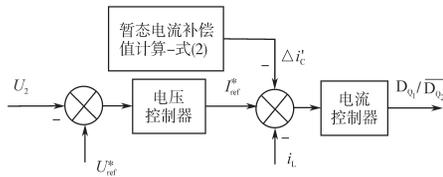


图3 瞬时电流补偿控制

Fig.3 Transient current compensation control

不同工作模式下的占空比分析: 工作模式①时, $U_2/U_1 = D_{Q1}$; 工作模式②时, $U_1/U_2 = 1/1 - \overline{D_{Q2}}$; 工作模式③时, 由于 $D_{Q1} = 1 - \overline{D_{Q2}}$, 当占空比保持不变时, 则根据 U_1 和 U_2 的大小实现能量的双向流动, 并且为零电压开通提供了条件。

2 分布式组网拓扑与控制

2.1 分布式组网拓扑

分布式发电不同于常规的大电网, 其组网多以风光储等相对较小容量的可再生能源发电形式接入电网。以多储能单元为例, 分布式组网拓扑如图4所示, 由于储能DC/DC变换器的容量和LC元件参数差异, 以及线路电抗的影响, 易诱发微电网内的系统谐振, 所以必须加以控制。特别地, 在离网情况下系统仅能靠自身储能单元实现母线电压稳定, 谐振问题就更为突出。在并网情况下多台储能DC/DC变换器通过单DC/AC变换

器实现与交流外网的连接, 基本的配置原则或依据如下:

1) 为保证系统稳态的安全裕量, 系统功率如下配置, 其中, $P_{AC/DC}$ 为AC/DC转换功率:

$$\sum_1^N P_i < 0.8 P_{AC/DC} \quad (3)$$

式中: $\sum_1^N P_i$ 为公共耦合点储能变换器功率之和。

2) 为保证系统动态安全, 峰值电流和电压按照1.2倍考虑, 即:

$$\begin{cases} i_{peak} < 1.2 i_n \\ U_{DCpeak} < 1.2 U_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_{peak} 和 U_{DCpeak} 为对应的峰值电流和母线电压; i_n 和 U_{dc} 为实测电流和母线电压。

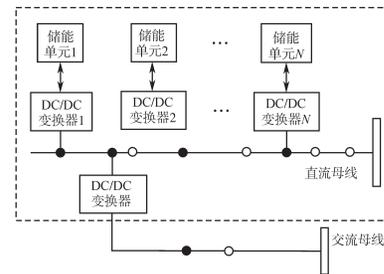


图4 分布式组网拓扑

Fig.4 Topology of distributed network

2.2 组网和解列控制

基于图4拓扑, 本文设计的分布式变换器组网和解列控制流程图如图5所示。

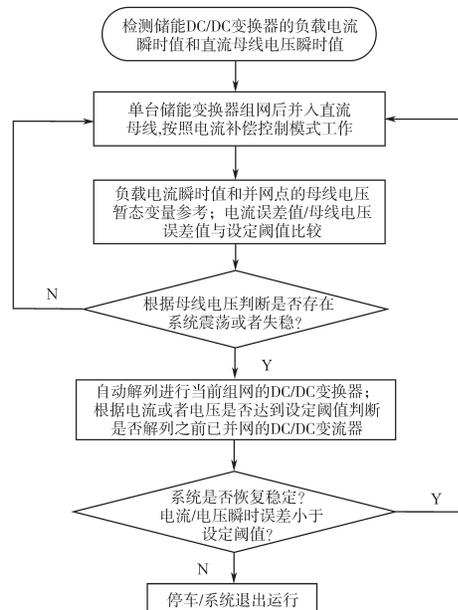


图5 组网和解列控制

Fig.5 Control of network and disconnection

图5基本原理如下: 1) 以多台储能DC/DC变换器各自的负载电流瞬时特征为依据, 以公共耦

合点的母线电压暂态变量为参考,通过双向DC/DC变换器降低并网点变换器动作带来的冲击电流,实现直流母线电压和系统稳定;2)对于单台变换器动作后可能带来的系统失稳则通过以上电流和电压变化趋势进行设备自动解列;3)无需上位机控制器的集中控制,只需要在单台储能DC/DC变换器中嵌入电压电流设定阈值,并编写扰动自补偿控制的解列算法即可。此外,该阈值设定要小于DC/DC变换器硬件系统安全阈值。

3 实验设计与分析

3.1 实验设计

根据上述拓扑和控制方法,为验证多台储能变换器的工作特性,搭建了含有超级电容器组、锂电池组、DC/DC变换器和DC/AC变换器的直流微电网实验平台,实验方案拓扑如图6所示。

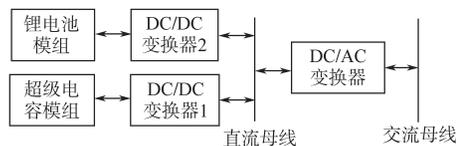


图6 实验方案拓扑

Fig.6 Topology of experiment scheme

储能单元参数为:超级电容单体额定电压48 V,超级电容单体容值83 F,电池单体额定电压3.2 V,电池单体充电静止电压3.65 V,超级电容模组工作电压220~400 V,电池模组工作电压220~295 V,电池最大持续放电电流40 A,电池最大持续充电电流40 A。变换器参数为:DC/DC变换器1功率30 kW,DC/DC变换器1工作电压100~500 V,DC/DC变换器2功率10 kW,DC/DC变换器2工作电压150~500 V,DC/AC变换器额定电流100 A,DC/AC变换器直流工作电压300~700 V。实验测试中,超级电容器储能模组采用9组单体串联的形式,输出持续时间15 s;电池储能模组选用磷酸铁锂动力型电池,采用82个串联的型式;峰值放电电流120 A,持续时间5 s;超级电容器DC/DC变换器额定功率30 kW;电池模组DC/DC变换器额定功率10 kW;双向DC/AC变换器额定功率40 kW,用于将直流电转换为交流电实现并网运行与离网隔离,此处不区分并网/离网要求。

3.2 实验分析

经过实验测试,图7~图9分别为对超级电容器组和锂电池组进行的放电、充放电、失稳切

除等波形,其中 U_{dc} 为共母线直流母线电压, i_{dc1} 为超级电容电流波形, i_{dc2} 为电池组电流波形,并且电流正值为充电模式,电流负值为放电模式。

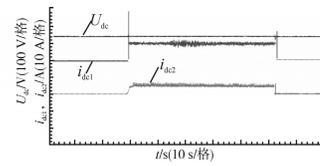


图7 放电波形

Fig.7 Waveforms of discharge

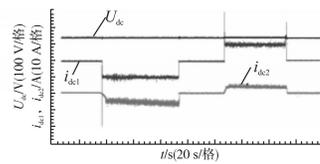


图8 充放电波形

Fig.8 Waveforms of charge and discharge

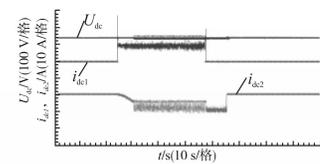


图9 失稳解列波形

Fig.9 Waveforms of unstable excision

图7中同时对DC/DC变换器1和DC/DC变换器2进行放电测试,可以看到放电电流快速跟踪给定,由于未做滤波处理,示波器图中暂态电流尖峰 i_{dc1} 达到了放电电流的10%~15%,而且对比 i_{dc1} 和 i_{dc2} 可以发现,相比电池,超级电容充电更为迅速;整个过程中母线电压稳定,未出现明显波动。为了验证连续的充放电暂态电流特性,图8中连续进行充放电测试,放电情况与充电情况下类似,可以看到充放电电流跟踪效果较好,暂态电流由于示波器未做滤波处理, i_{dc1} 会出现一个较大的尖峰,此处判断为噪声,在连续充放电情况下,母线电压保持稳定。为了验证并网和解列的控制思路,通过调整线路和控制器参数,制造了设备投入后震荡的效果。图9中可以看到 i_{dc2} 投入后电流出现震荡,导致母线电压亦出现震荡,此时根据文中解列控制策略要求需要解列DC/DC变换器2,从图9中可以看到母线电压迅速恢复稳定,控制效果明显。该方法不需要增加集中控制器,仅通过增加必要的通讯线路即可实现。

4 结论

本文针对分布式储能DC/DC变换器应用中

可能存在的系统震荡或失稳问题,以负载电流瞬时值变化和母线电压暂态变量为参考,提出了双向DC/DC变换器的电流补偿控制,并对共母线组网的多台储能DC/DC变换器按照母线趋势进行设备自动组网和解列,避免直流微电网系统失稳。最后通过实验证明了该方法的正确性和有效性,为新能源分布式发电特别是直流微电网控制提供了一个新的规划和设计思路。

参考文献

- [1] 朱永强,郝嘉诚,赵娜,等. 能源互联网中的储能需求、储能的功能和作用方式[J]. 电工电能新技术, 2018,37(2):68-75.
- [2] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 2015,39(11):3014-3022.
- [3] 孙秋野,滕菲,张化光,等. 能源互联网及其关键控制问题[J]. 自动化学报,2017,43(2):176-194.
- [4] 黄际元,李欣然,黄继军,等. 不同类型储能电源参与电网调频的效果比较研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(3): 49-53.
- [5] 孔力,裴玮,叶华,等. 交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(9):1-9.
- [6] 孙洁,王增平,王英男,等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(2):56-62.
- [7] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):184-192.
- [8] 孙秋野,王睿,马大中,等. 能源互联网中自能源的孤岛控制研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3087-3098.
- [9] Cao J W, Yang M B. Energy Internet-towards Smart Grid2.0 [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Networking and Distributed Computing. Los Angeles, USA: IEEE,2013:105-110.
- [10] Radwan A A A, Mohamed A R I. Linear Active Stabilization of Converter-dominated DC Microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):203-216.
- [11] 常晓勇,李永丽,陈晓龙,等. 基于超级电容的直流微电网电压波动抑制研究[J]. 电力电子技术,2017,51(4):61-64.
- [12] Galigekere VP, Kazimierczuk MK. Analysis of PWM Z-source DC-DC Converter in CCM for Steady State [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(4): 854-863.
- [13] 支娜,张辉,肖曦,等. 分布式控制的直流微电网系统级稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(2):368-378.
- [14] 和贝,张建成,钟云,等. 基于Boost-Buck电路的光伏发电系统电压稳定研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):100-103.
- [15] 李继方,汤天浩,姚刚,等. 基于切换系统的储能节能系统双向DC-DC变换器建模与控制[J]. 电工电能新技术, 2011,30(4):21-25.
- [16] 李建林,徐少华,惠东,等. 一种适合于储能PCS的PI与准PR控制策略研究[J]. 电工电能新技术,2016,35(2):54-61.
- [17] 栗赛男,马建伟,孙芊,等. 考虑不确定出力的微网内分布式发电和储能的容量配置[J]. 电工电能新技术,2016,35(8):21-28.
- [18] 徐文进,周桂新. 基于分布式电源的能源路由器设计研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(16):64-71.

收稿日期:2018-06-25

修改稿日期:2018-08-07