

储能变流器多机并联离网起动方式研究

随着分布式电源和微电网的发展,储能系统越来越凸显其重要作用。由于储能变流器多台并联离网起动有很多实际困难,设备很难正常起动。分析了储能变流器并联环流的产生原因以及其影响,主要介绍了储能变流器多机并联离网起动的下垂控制方法,在一定程度上可以解决在储能变流器并联离网起动时由于产生环流导致起动失败这一问题。

谢毓广 罗亚桥 郑国强 王小明 郭力/国网安徽省电力公司电力科学研究院

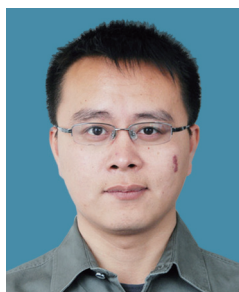
0 引言

随着越来越多的分布式能源得到应用,分布式发电的引入对主电网带来一些不利影响也受到人们越来越多的关注。例如风力、光伏发电的间歇性、波动性和随机性将严重影响电网的稳定性、电能质量及经济性。储能系统对网络的安全稳定运行起到至关重要的作用。储能系统可以平滑有功功率波动以及在电网故障时独立运行给负载供电。而随着用电设备的不断增加,对储能装置的容量可靠性和安全性等要求也随之提高,多装置并联运行可以灵活地扩充系统容量,组成并联冗余系统以提高系统的可靠性且具有较高的可维修性。因此,多储能装置并联运行以提高整机容量已成为储能技术领域发展的重要趋势。

储能变流器实际运行有很多困难,设备很难正常起动。如果各并联单元电压矢量的相位,幅值不完全相等,即使是很小的差值也会产生远大于系统额定电流值的环流量,并且这一电流不经过负载,仅在两台逆变电源之间流动。因此,并联运行的各逆变电源之间必须采取均流措施,以保证电源功率器件间电

流应力和热应力的均匀分配^[1]。传统储能变流器主要以并网运行为主。随着分布式发电和微电网技术的发展,要求纯变流器不但具有并网P/Q工作模式,而且具有离网V/F工作模式。离网模式下,多个储能系统可以看成多个逆变器并联系统。目前均流控制的方法包括互联通信线、无互联通信线、集中式、主从方式^[2]和瞬时均流控制等多种方式。它需要专门的通信线路进行连接,成本高、冗余度大。

文献[3]采用的是共直流母线的并联变流器拓扑结构,并研究了并联零序环流控制策略。文献[4]提出了一种无主从自均流的并联并网电池储能系统,并将系统中的变流器设计为双向可扩展变流结构。文献[5]提出了基于独立直流母线的载波移相并联策略,以有效抑制零序环流。文献[2]确定了基于主从式三电平变流器并联技术的大功率储能系统方案。文献[6]分析了网络控制加入到基于功率下垂控制的逆变器并联系统中的意义,给出了基于网络控制及PQ下垂控制的逆变器并联系统的工作原理。文献[7]分析了逆变器输出电压产生直流分量的原因,介绍了逆变器并联系统直流环流检测和抑制方法。文献[8]介绍在孤岛运行时电压-相角下垂控制控制系统,同时设计了适用于微电网同步运行过程的同步控制器。文献[9]推导了储能系统在并网运行及孤岛运行模式下不同的控制策略,利用仿真结果的分析和总结,提出了一种适用于大容量储能系统的故障诊断及处理策略。文献[10]在DigSILENT



谢毓广/工程师

关键词/Keywords

储能变流器·
离网模式·
下垂控制·
环流·

仿真平台上搭建了并网光伏发电系统的工程实用模型及其控制模型。文献[11]基于DigSILENT软件,介绍了分布式电源逆变器控制模块的仿真模型,并对由恒功率控制的微源和V/F控制的储能装置组成的微电网进行了联网转孤岛运行的仿真。主要介绍基于PQ下垂控制方式的储能系统控制策略,并在DigSILENT平台上搭建模型,进行仿真验证。

1 储能系统的拓扑结构

本文采用三相半桥电压源型PWM整流拓扑, V 为换流器的交流侧输出, 可通过变压器与交流系统相连, 该点相电压和线电压分别为 u_{vj} 和 i_j ($j=a,b,c$), u_{sj} ($j=a,b,c$) 为储能变流器并网点电压。直流侧为锂电池储能单元, 交流侧采用了目前普遍使用的LCL滤波器, 与单L滤波器相比, 其滤波效果较好, 占用的总体积较小; 滤波器与电网之间通过工频隔离变压器连接, 这样既保证了安全, 又能使微电网稳定控制器的输出电压与电网电压相匹配。滤波器、变压器和线路电抗的串联可等效成 $R_0 + L_0$ 串联支路。储能系统主电路拓扑图如图1所示。

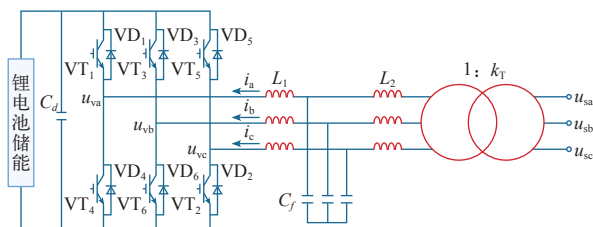


图1 储能系统主电路拓扑

2 环流产生的原因及特性

分布式发电系统中, 逆变电源间的环流是由各逆变电源模块的输出特性差异所形成的。只有并联的各逆变电源均分负载电流而不产生环流, 并联系统才能够正常及高效地工作。为了消除逆变器之间的环流, 必须详细分析环流产生的原因及其特性。

本文以两台逆变电源并联为例, 其原理如图2所示。在不考虑输出滤波器影响的条件下, 由于

实际系统中的线路阻抗远远大于线路感抗, 可忽略线路感抗影响。

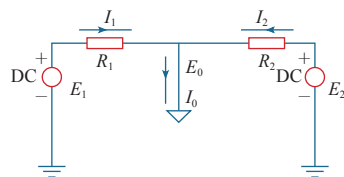


图2 两台并联逆变器并联等效示意图

假设稳态时各逆变电源的输出电压波形均为标准正弦波, 且不考虑波形畸变的影响。图2中, R_1 、 R_2 为线路阻抗, E_1 、 E_2 、 E_0 、 I_1 、 I_2 和 I_0 分别表示1#和2#逆变电源以及并联系统的输出电压、电流矢量。各变量计算公式如下

$$I_1 = \frac{(E_1 - E_0)}{R_1} \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{(E_2 - E_0)}{R_2} \quad (2)$$

$$I_0 = I_1 + I_2 \quad (3)$$

定义“环流”

$$I_H = \frac{I_1 - I_2}{2} \quad (4)$$

则有

$$I_H = \frac{(E_1 - E_2)}{2R} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{I_0}{2} + I_H \\ I_2 &= \frac{I_0}{2} - I_H \end{aligned} \quad (6)$$

两台逆变电源并联运行时, 各单元的输出电流由两部分组成: 一部分是提供给负载的电流; 另一部分就是流动在两并联电源之间的环流 I_H 。对并联单元来说, 负载是均分的, 环流的存在就导致了并联单元输出电流的差异。当环流对各单元输出电压呈不同负载特性时, 各单元输出功率也相应改变, 使得各逆变电源所承担的负载不均衡。由于线路阻抗 R 非常小, 如果各并联单元输出电压矢量的相位、幅值不完全相等, 即使是很小的差值也会产生远大于系统额定电流值的环流量, 并且这一电流不经过负载仅在两台逆变电源

之间流动。此时如果将两台电压闭环控制的逆变器电源不加任何处理，简单并联，系统就相当于短路，是非常危险的。

3 储能变流器离网模式下的控制策略

微电网系统在并网模式下正常工作，当检测到电网电压有效值不正常、电网频率不正常、电网故障或人为切断局部电网时，微电网系统将从大电网中脱离，称为离网状态。离网模式下，电网失电，储能变流器的DC/AC变流器不再具备稳定中间直流侧电压的能力，考虑到多台变流器并联均流控制，离网模式下均采用下垂控制。本文对于每个逆变器的电压输出都设计和使用一个控制器。每个逆变器的控制是独立的，下垂控制策略也已被用于逆变器的独立控制。下垂控制的基本原理取决于任何同步发电机通过阻抗连接到电网的功率方程。这是一个独立的控制，可提高系统的可靠性和灵活性。这种方法使逆变器之间的功率相等，并且使每个逆变器保持独立。但是，在将逆变器连接到网络上时，同步问题会发生。相对于负载电压具有输出电压浮动的逆变器（与电网保持同步），给出一个平滑的方式连接逆变器。所有逆变器的调制信号必须通过控制方案来满足以下目标：

- 1) 电压控制。追踪下垂法产生的正弦电压基准。
- 2) 负载总线上的感应电压作为参考电压形成。在变压器前端的电压感应器感测负载电压，将输出电压与负载相结合。

上述形成了一种分层控制，内电压环在下垂控制模式下构成控制策略的驱动回路。考虑到两个逆变器通过纯电感连接到一个线性负载，如图3所示，用具有纯电感的线来简化分析。矢量图如图4所示，表示负载电压、电源电压以及负载电流

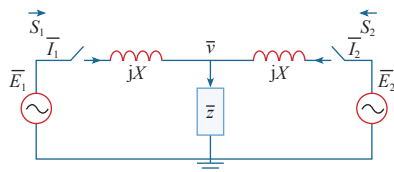


图3 连接到负载的逆变器

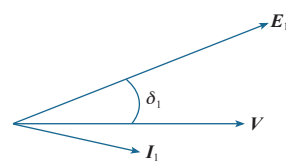


图4 逆变器1输出电压和电流的向量表示

之间的相量关系。逆变器1输出的复功率可以根据下式给出

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = V_1 I_1^* \quad (7)$$

式中， I_1^* 为逆变器1的共轭电流，由下式表示

$$I_1^* = \left[\frac{E_1 \cos \delta_1 + jE_1 \sin \delta_1 - V}{jX} \right]^* \quad (8)$$

把式（8）代入式（7）的实部以及虚部，可以得到

$$P_1 = \frac{E_1 V}{jX} \sin \delta_1 \quad (9)$$

$$Q_1 = \frac{E_1 V \cos \delta_1 - V^2}{jX} \quad (10)$$

同理对于逆变器2，其功率方程推导如上述所述。

为了获得稳定的运行，应根据负载功率控制逆变器输出电压的大小以及输出频率。逆变器之间没有真正的无功循环。

4 仿真分析

为验证本文所提控制策略的有效性，在DigSILENT平台上搭建仿真模型。

为检验PQ下垂控制方法的抗扰动性能，设置仿真2 s时，负荷增加，仿真波形如图5所示。实线和虚线分别为储能单元1、2的有功功率，电压幅值在0.999 9的左右。

电流和电压的幅值如图6所示，储能单元的电压电流幅值有一定的偏差。

由仿真图可以看出，当负荷增加时，由储能单元平均分配这部分增加的负荷，同时可维持负荷点电压和频率的稳定。

5 结束语

通过对传统下垂控制原理的分析及结合储能

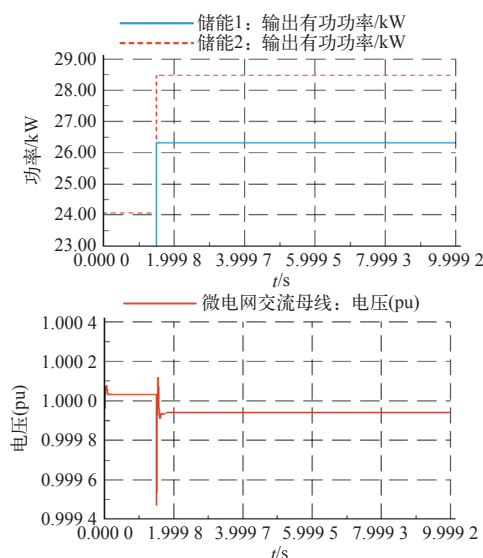


图5 功率和电压标么值

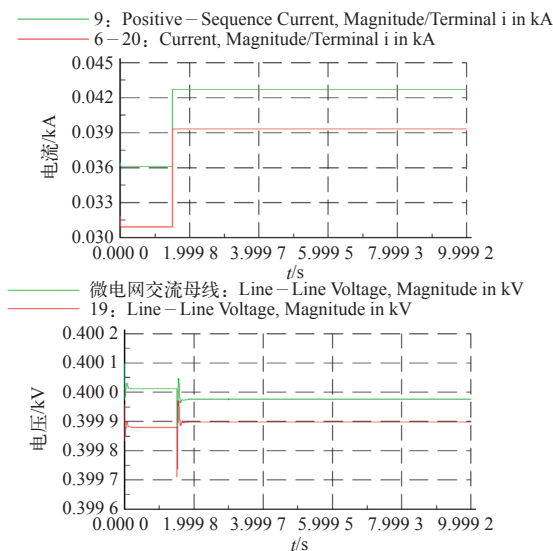


图6 电流和电压

变流器的电流环的控制策略, 介绍并运用PQ下垂控制策略。最后在DigSILENT仿真平台搭建模型, 对本文所提控制策略进行仿真验证, 证明了本文所提控制策略的有效性, 但仍需进一步改进。

参考文献

- [1] 袁泉. 大功率储能变流器的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [2] 刘隽, 等. 基于主从式控制三电平变流器并联的储能系统 [J]. 电气传动, 2014 (3): 27-31.
- [3] 熊超. 基于PWM调制的变流器并联零序环流控制策略研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [4] 赵彪, 于庆广, 王立雯, 等. 无主从自均流并联并网电池储能系统 [J]. 电力系统自动化, 2012 (2): 108-112, 117.
- [5] 韩坤, 杨恩星, 陈国柱. 无零序环流三相PWM变流器线路级并联策略 [J]. 电力电子技术, 2009 (3): 65-67.
- [6] 俞宏霞. 基于网络控制及功率下垂控制的单相逆变器并联系统的建模研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [7] 陈良亮, 肖岚, 龚春英, 等. 逆变器并联系统直流环流产生原因及其检测与抑制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004 (9): 60-65.
- [8] 郜登科, 姜建国, 张宇华. 使用电压-相角下垂控制的微电网控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2012 (5): 29-34.
- [9] 徐涛. 大容量储能系统的控制与保护策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [10] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于DIgSILENT的并网光伏发电系统的建模与仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2014 (3): 49-55.
- [11] 杨秀, 宗翔. 基于DIgSILENT软件的微电网动态仿真 [J]. 上海电力学院学报, 2012 (3): 1-4.

(收稿日期: 2015-12-20) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告