

基于柔性变电站的双向DC/AC 变换器关键控制技术综述

陈亚爱,赵军伟,周京华,赵荀

(北方工业大学 北京市变频技术工程技术研究中心,北京 100144)

摘要:基于交直流混合配电技术的柔性变电站是未来配电网发展的一大趋势,柔性变电站因其具备中/低压、交/直流多端接口、具有潮流柔性管控、多形态能源接入、故障限流和隔离等多种功能而受到广泛关注。双向DC/AC变换器是柔性变电站的重要组成部分,可实现低压交直流端口间能量的双向流动。为使双向DC/AC变换器在柔性变电站环境中安全可靠运行,研究双向DC/AC变换器控制策略成为迫切的需求。以张北交直流配电网及柔性变电站示范工程为实例,根据双向DC/AC变换器不同控制目标,从谐波补偿、不平衡电压抑制、多机并联等关键控制技术进行综述,并对基于柔性变电站双向DC/AC变换器控制技术的发展趋势进行探讨,为建设柔性变电站工程提供参考。

关键词:柔性变电站;双向DC/AC变换器;谐波补偿;电压不平衡抑制;多机并联

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20355

Summary of Key Control Techniques for Bidirectional DC/AC Converters Based on Flexible Substation

CHEN Yaai, ZHAO Junwei, ZHOU Jinghua, ZHAO Xun

(Inverter Technology Engineering Research Center of Beijing,
North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Flexible substation based on AC/DC hybrid power distribution technology is a major trend for future distribution network development. It has attracted wide attention due to multiple functions, such as its multi-terminal interfaces for medium/low and AC/DC voltage, flexible power flow control, multi-modal energy intervention, fault current limiting and isolation. The bidirectional DC/AC converter is an important part of the flexible substation, which can realize the bidirectional flow of energy between the low voltage AC and DC ports. The study for bidirectional DC/AC converter control strategy is an urgent need for the safe and reliable operation. Taking AC/DC distribution network and flexible substation demonstration project in Zhangbei as an example, according to different control objectives of bidirectional DC/AC converters, it was reviewed from key control techniques such as harmonic compensation, unbalanced voltage suppression, and multi-machine parallel connection. The trend for bidirectional DC/AC converter control strategy of flexible substation was discussed, which provides reference for the construction of flexible substation project.

Key words: flexible substation; bidirectional DC/AC converter; harmonic compensation; unbalanced voltage suppression; multimachine parallel

为解决不同形式的新能源接入电网以及负荷用电多样化的需求,2015年全球能源互联网研究院提出柔性变电站的概念^[1],并将其付之于实践,建立了世界首个示范工程——张北交直流配电网及柔性变电站示范工程,其中,由国网冀北电力有限公司建设运营的柔性变电站于2018年

1月在阿里数据港张北数据中心成功并网运行^[2]。

张北柔性变电站具有10 kV, 380 V两个交流端口, ±10 kV, 750 V两个直流端口,四个端口均支持能量双向流动^[3],交流380 V和直流750 V两个端口间采用双向DC/AC变换器进行联接^[4]。双向DC/AC变换器的稳定运行是实现柔性变电站

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51777002);北京市高水平创新团队建设计划资助项目(IDHT20180502)

作者简介:陈亚爱(1961—),女,硕士,教授,Email:eya@ncut.edu.cn

安全高效应用的基础,而柔性变电站是一个具有大量电力电子装置、非线性负荷、不平衡负荷等复杂应用场所,需采用相应的控制技术,保证双向DC/AC变换器输出电能质量^[5]。

以张北交直流配电网及柔性变电站示范工程为实例,阐述柔性变电站双向DC/AC变换器控制技术,重点针对谐波补偿、电压不平衡抑制、多机并联等关键控制深入分析,并探讨柔性变电站用双向DC/AC变换器控制技术的发展趋势。

1 柔性变电站示范工程

1.1 整体示范工程组网方案

张北交直流配电网及柔性变电站示范工程采用基于柔性变电站的交直流配电技术,用户是阿里数据港张北数据中心,其组网方案如图1所示。柔性变电站为数据中心服务器、冷却设备、电动汽车等直流负荷和其它交流用电设备供电^[6]。

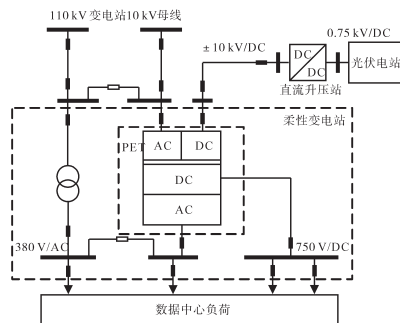


图1 示范工程组网方案

Fig. 1 Demonstration engineering networking scheme

1.2 柔性变电站系统组成

柔性变电站是电力电子技术和变电站技术的深度融合^[7],其一次系统以电力电子设备为基础,结合先进的计算机技术、信息通信技术以及控制保护技术^[8]。相比于传统变电站,柔性变电站不仅是能量传输的节点,也是电网调控节点和负荷调控节点,可实现分布式电源及多元负荷友好接纳、潮流精确灵活控制、故障快速隔离等功能,是进行能量变换和传输的新型变电站^[9]。柔性变电站参与潮流调控,打破了原电网只能根据阻抗进行潮流分布的刚性结构,使电网的运行与调度更加灵活。柔性变电站与交直流配电网相结合,推动了“源-网-荷”协调发展,提高了用户供电电能质量,具有很好的应用前景^[10]。

柔性变电站核心设备是多功能交直流电力电子变压器(PET)^[11],可根据系统电压等级及不同负荷情况设置多个端口。以张北柔性变电站

为例,其PET具有交流10 kV,380 V和直流±10 kV,750 V四个端口,如图2所示,各端口均可实现能量双向流动,满足潮流精确灵活控制需求。交流10 kV,直流±10 kV和750 V端口采用多模块一体化结构,实现了一、二次设备的高度融合;交流380 V端口采用独立柜式结构,以便于系统扩容扩展^[6]。

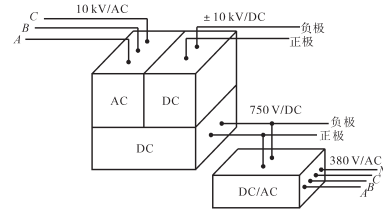


图2 PET结构示意图

Fig. 2 PET structural representation

双向DC/AC变换器是柔性变电站的重要组成部分,可采用两电平或多电平变流器单台或多台并联结构,以支持大功率负荷。双向DC/AC变换器直流侧联接PET 750 V直流母线、交流侧联接380 V交流电网和本地负荷,作用是将PET低压侧直流电逆变为交流电为负荷供电或将功率回馈电网,也可将交流电整流为直流辅助PET启动。

2 双向DC/AC变换器工作模式分析及控制技术

双向DC/AC变换器作为柔性变电站接口装置,能根据柔性变电系统上层调度控制低压交直流端口之间的功率流向。按照是否与电网相联接双向DC/AC变换器的工作模式分为并网、离网及并离网切换,并网工作模式下能实现功率的双向流动,离网工作模式下功率由直流750 V端口流向交流负载。根据柔性变电站设计需求与负载特性,双向DC/AC变换器在运行时需着重考虑:1)并网输出电流、离网输出电压谐波畸变问题;2)电网电压不平衡、离网输出电压不平衡问题;3)多机并联等问题。因此,其控制分类如图3所示。

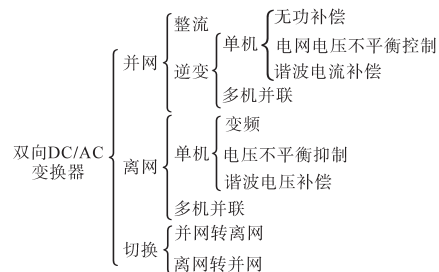


图3 双向DC/AC变换器工作模式及相应控制

Fig. 3 Bidirectional DC/AC converter working mode and corresponding control

2.1 并网工作模式及控制技术

双向DC/AC变换器在并网工作模式根据功率流向不同又可分为整流模式和逆变模式。工作于整流模式时,将直流母线电压控制为750 V,功率由交流380 V端口流向直流750 V端口。在整流模式下双向DC/AC变换器通常采用电压电流双闭环控制,电压外环用于控制直流母线电压,电流内环用来提高系统的动态响应速度^[12]。

双向DC/AC变换器工作在并网逆变模式向电网馈送能量,功率由直流750 V端口流向交流380 V端口,需精确控制变换器输出功率,通常采用PQ控制策略^[13],即功率外环、电流内环控制,变换器并网时交流侧电压被钳位为电网电压,只需控制变换器输出电流即可控制系统向电网传输的功率,因此也可采用单电流闭环控制^[14]。柔性变电站中存在大量电力电子设备、非线性负载,且电网会出现三相不平衡情况,都将导致双向DC/AC变换器并网时出现电流谐波畸变问题,因此并网逆变模式下还需加入谐波电流补偿控制、不平衡电网下并网逆变控制技术及多机并联控制技术。

2.2 离网工作模式及控制技术

双向DC/AC变换器工作在离网模式为交流负载供电,离网下变换器交流侧失去电网电压钳位,因此需要对变换器输出电压及频率进行控制,通常采用恒压恒频控制策略^[15]。柔性变电站中交流负载包含非线性负载、单相负载,导致双向DC/AC变换器输出电压谐波畸变以及电压不平衡问题,因此在离网时还需考虑谐波电压补偿控制、电压不平衡抑制以及多机并联控制。

2.3 并/离网切换及控制技术

柔性变电站中双向DC/AC变换器的并/离网切换分为并网转离网和离网转并网,是并网、离网两种稳态模式间相互切换的暂态过程。离网下DC/AC变换器输出电压幅值和相位与电网电压可能存在偏差,直接闭合并/离网切换开关将导致较大电流冲击,因此需要进行电压的预同步控制^[16]。在并网转离网时将电网电压的幅值与相位信息作为离网控制的初始值,保证在切换瞬间电压不会突变;在离网转并网时同样需要根据电网电压的幅值及相位信息对离网下变换器输出电压进行调节,待两电压幅值及相位相同时闭合并/离网开关,从而完成切换过程。并/离网的切换时间由电压预同步时间及切换开关响应时间共同决定^[17]。

3 双向DC/AC变换器关键控制技术

在不同工况所采用的控制技术中,并网整流、逆变及离网控制是实现双向DC/AC变换器控制功能的基础,其控制技术已得到广泛研究和应用。较之传统变电站,柔性变电站包含大量电力电子设备、单相及非线性负载,会引发更为严重的电能质量问题^[18],因此,谐波补偿、电压不平衡抑制、多机并联等控制成为柔性变电站中双向DC/AC变换器能否正常运行的关键,本文将对这些关键控制技术展开论述,而并网整流、逆变和离网下的基础控制因其应用广泛而不赘述。

3.1 谐波补偿技术

实际中电网电压常含有低次谐波,会导致双向DC/AC变换器在并网时电流畸变,而离网时带非线性负载使输出电压畸变,需采用谐波补偿控制算法对并网输出电流及离网输出电压谐波进行补偿,以确保DC/AC变换器输出电能质量。电流、电压的谐波补偿虽控制对象不同,但控制原理相同,下面将以谐波电流补偿控制为例进行阐述。

谐波补偿对系统采样、计算、控制的实时性和精确性要求较高,关键在于谐波检测与谐波指令跟踪控制。根据谐波电流补偿方式不同可分为谐波电流全补偿和分次谐波电流补偿^[19-22],而双向DC/AC变换器的LC滤波器决定其只能对LC截止频率以下的谐波进行补偿,因此需采用分次谐波补偿控制技术对系统中的低频谐波进行补偿。常用的分次谐波电流补偿控制按所用控制器不同分类为:基于PI控制器的分次谐波补偿、基于PR控制器的分次谐波补偿、基于VPI控制器的分次谐波补偿。

3.1.1 基于PI控制器的分次谐波电流补偿

由于PI控制器可实现对直流信号的无静差跟踪,因此可将需补偿的某次谐波在相应旋转坐标系下转换为直流量,对每次谐波对应的直流量分别进行PI控制,可实现对指定次谐波的无静差跟踪。文献[23]采用PI控制器在多个同步旋转坐标系下对电流谐波分次补偿,介绍了谐波电流控制器设计方法,谐波补偿控制环如图4所示。该技术对每个频率的谐波控制均需要进行相应的坐标变换以及设置PI控制器,对指定次谐波提取精度较高,但所需计算量较大将占用大量控制芯片资源。在电网不平衡情况下,各次谐波均包含正负序分量,采用此控制技术需要将正、负序分

量分离后分别进行控制^[24],控制系统较为复杂。

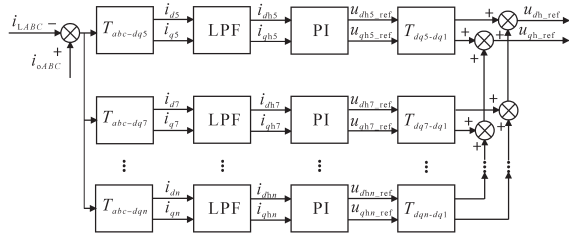


图4 基于PI控制器的分次谐波电流补偿控制框图

Fig. 4 Blocking harmonic current compensation control block diagram based on PI controller

3.1.2 基于PR控制器的分次谐波电流补偿

谐振控制器源于控制理论中的内膜原理,在谐振点处产生无穷大增益,实现对指定频率的谐波电流无差补偿。文献[25]采用比例谐振(PR)控制器实现对谐波电流控制,因其具有频率选择特性而省去了谐波检测环节,控制框图如图5所示。它基于两相静止坐标系,可对同一频率的正、负序谐波同时补偿,无需坐标变换,但每个控制器只能对一个频率的谐波进行补偿,需根据被补偿谐波次数不同增加相应的控制器,其计算量适中,但PR控制器不易调节参数,容易造成临近频率串扰并引起系统谐振^[26]。

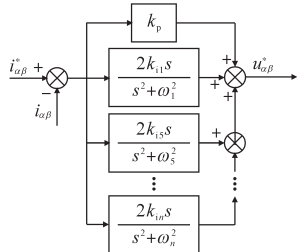


图5 基于PR控制器的分次谐波电流补偿控制框图

Fig. 5 Blocking harmonic current compensation control block diagram based on PR controller

3.1.3 基于VPI控制器的分次谐波电流补偿

PR控制器在补偿较高次谐波时需加入延时补偿,而矢量比例积分(VPI)控制器在不加入任何延时补偿的情况下可补偿到61次谐波^[27],它是PR控制器的改进形式,同样可在谐振频率处产生极大的开环增益,因此具备频率选择特性,与PR控制器相比,VPI控制器不存在谐振尖峰问题,具有更好的补偿性能。文献[28]提出一种基于同步旋转坐标系的VPI控制策略,如图6所示,在基波旋转坐标系下对需补偿的各次谐波设置相应的VPI控制器,利用其频率选择特性对指定频率处产生无穷大开环增益,从而实现对谐波电流的选择性提取与无静差跟踪控制,该控制技术具有较好的控制性能,参数调节较PR控制器更为容易,

但该控制策略基于同步旋转坐标系,在不平衡情况下不能同时补偿正序和负序谐波分量。

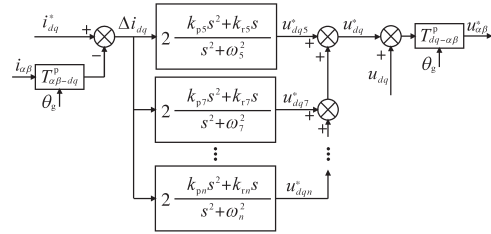


图6 基于VPI控制器的分次谐波电流补偿控制框图

Fig.6 Blocking harmonic current compensation control block diagram based on VPI controller

为解决不平衡情况下的分次谐波补偿问题,文献[29]采用基于两相静止坐标系下的VPI控制技术,针对离网下谐波含量较高的5次、7次电压谐波进行补偿。较之文献[28]所提控制技术,该方案在不平衡情况下可同时补偿各次谐波中的正、负序分量,其控制框图如图7所示,在V/f控制的基础上分别设置5次、7次谐波对应的VPI控制器,对电压谐波进行补偿,经实验验证,5次谐波补偿率为96.7%,7次谐波补偿率为95.5%,具有很好的补偿效果。

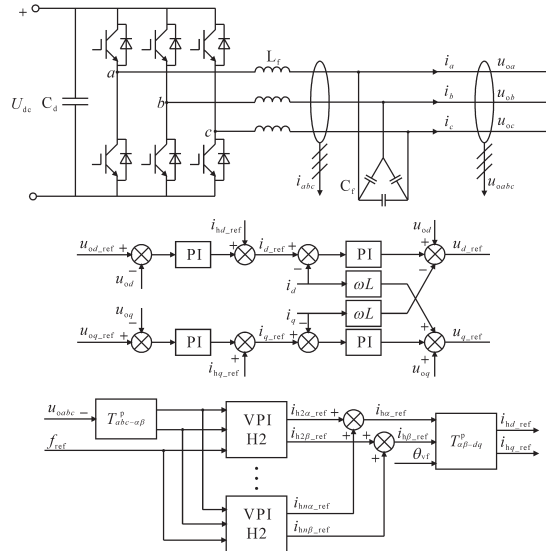


图7 离网下谐波电压补偿控制框图

Fig.7 Block diagram of harmonic voltage compensation control under isolated island

对上述几种分次谐波补偿控制技术进行总结对比,将其各自特点如下:基于PI控制器的分次谐波电流补偿谐波提取精度高,计算量大,不平衡下需进行正、负序分离,控制系统复杂;基于PR控制器的分次谐波电流补偿计算量适中,基于两相静止坐标系,可同时补偿不平衡正、负序谐波分量,PR控制器不易调节参数;基于VPI控制器的分次谐波电流补偿计算量适中,VPI控制器易于调节参数,控制性能好,基于同步旋转坐标

系时无法同时补偿正、负序分量,基于两相静止坐标系时可同时补偿正、负序谐波分量。

3.2 电压不平衡抑制技术

电网电压不平衡是常见故障之一,当电网不平衡时电压包含正序和负序分量,负序分量将导致双向DC/AC变换器输出电流谐波含量增加。离网模式时大功率单相负载接入等因素更会导致双向DC/AC变换器输出电压不平衡,影响供电质量。因此,需采用适当的电压不平衡抑制技术对并网电网电压不平衡造成的输出电流畸变及离网输出电压不平衡进行有效抑制。目前常用的电压不平衡抑制技术按采用控制器不同分类为:基于PI控制器的电压不平衡抑制、基于PI+PR控制器的电压不平衡抑制、基于PI+VPI控制器的电压不平衡抑制。

3.2.1 基于PI控制器的电压不平衡抑制

文献[30-31]采用信号延迟对消算法将电压信号进行正负序分离,由于正、负序分量在各自旋转坐标系下均表现为直流量^[32],因此可采用PI控制器分别对正、负序分量在相应的旋转坐标系下进行控制,如图8所示。

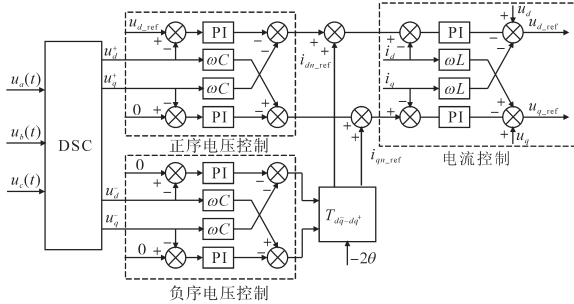


图8 基于PI控制器的电压不平衡抑制控制框图
Fig.8 Block diagram of voltage imbalance suppression control based on PI controller

该控制方案需提取电压的正、负序分量,计算量大,且在同步旋转坐标系下对正、负序分量分别进行控制需四个PI控制器,控制结构较复杂,需调节参数过多,增加了控制难度。实际应用中由于锁相环性能、控制器采样频率、电网频率波动等因素会导致正负序分离过程中产生误差,影响控制效果;控制器进行正负序分离计算量大,难以保证控制的实时性,也会降低控制精度,因此,为减小控制计算量、简化控制结构,在三相不平衡情况下取消对电压、电流正负序分量提取环节成为研究热点^[33]。

3.2.2 基于PI+PR控制器的电压不平衡抑制

文献[34]指出将负序基波旋转坐标系下的负

序分量PI控制器折算到正序旋转坐标系下的负序分量控制器可等效为基于余弦信号内模函数的PR控制器,谐振频率为2倍基波频率。因此,采用PI控制器对正、负序分量分别控制可等效于采用PI控制器对正序分量控制加PR控制器对负序分量控制。文献[35]基于正序旋转坐标系采用PI+PR控制策略,PI用于控制基波正序电压,PR用于控制基波负序电压,如图9所示。较之文献[30-31]控制方案,该方案控制结构明显简单,无需进行正负序分离,计算量小,但文中采用的PR控制器同样有参数调节不易、引起系统谐振等问题。

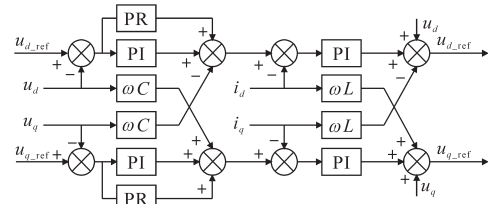


图9 基于PI+PR控制器的电压不平衡抑制控制框图
Fig.9 The block diagram of voltage imbalance suppression control based on PI+PR controller

3.2.3 基于PI+VPI控制器的电压不平衡抑制

为避免PR控制器不易调节参数的问题,文献[29]采用基于正序旋转坐标系的PI+VPI控制技术,如图10所示。该控制技术同样无需正负序分离,PI用于控制基波正序电压,VPI用于控制不平衡二倍频电压分量,具有参数易于调节、控制性能高等优点,在实际应用中双向DC/AC变换器输出电压能够保持较好平衡度。

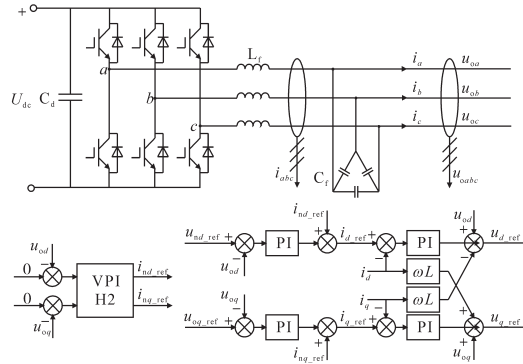


图10 离网下输出电压不平衡抑制控制框图
Fig.10 Block diagram of output voltage imbalance suppression control under isolated island

对以上几种不平衡电压抑制技术进行总结对比,其各自特点如下:基于PI控制器的电压不平衡抑制需进行正、负序分离,控制系统复杂,控制精度低;基于PI+PR控制器的电压不平衡抑制

无需正、负序分离,控制结构简单,PR控制器不易调节参数;基于PI+VPI控制器的电压不平衡抑制无需正、负序分离,控制结构简单,VPI控制器易于调节参数,控制性能好。

3.3 多机并联控制技术

为实现系统扩容扩展,双向DC/AC变换器通常需多台并联运行。在柔性变电站中,双向DC/AC变换器并联方式为共交直流母线联接,如图11所示。DC/AC变换器并联运行在增大系统容量的同时,能提高系统的冗余性和可靠性^[36],但交直流侧均对应相联,存在零序电流环流通路,且每台DC/AC变换器硬件参数的差异及控制上无法绝对同步,则无法避免并联模块间存在环流^[37]。环流可引起系统输出电压电流畸变、功率损耗增大,降低系统的功率密度、超过开关器件电流应力的环流会使器件损坏,在共交直流母线并联系统中,不经过三相交流电网而直接在并联系统各模块间流动的环流给开关器件带来的损害更为严重,此外,高频环流还将导致严重的电磁干扰问题^[38-39]。

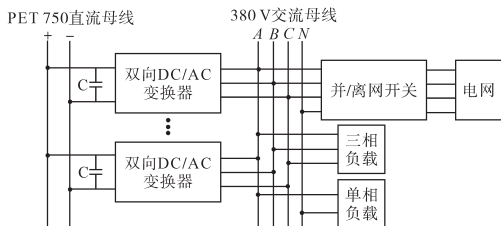


图11 双向DC/AC变换器并联示意图
Fig.11 Schematic diagram of bidirectional DC/AC converter in parallel

在共交直流母线的双向DC/AC变换器并联系统中,环流抑制通常可以从硬件和软件两个角度考虑,环流抑制技术分类如下:硬件方法有加隔离变压器和串联高阻抗耦合电感;软件方法有零序电压补偿和调制策略改进。

3.3.1 基于硬件的环流抑制方法

硬件方法即在系统中增加额外的设备以阻断环流通路或对环流进行抑制,主要方法有:1)在主电路交流侧加装隔离变压器简单有效,但体积大、价格贵,变压器还存在铁损、铜损,影响系统效率^[40];2)在主电路交流侧串联高阻抗耦合电感,提高线路阻抗可有效抑制中、高频环流,但对低频环流抑制效果不佳^[41],也使系统变复杂。

3.3.2 基于软件的环流抑制方法

软件方法采用相应控制算法,尽可能减小系统环流以及使各变换器输出功率合理分配,因其

不额外增加系统体积和成本,受到广泛应用。共交直流母线的双向DC/AC变换器并联环流抑制技术主要是对系统零序环流进行抑制,文献[42]对两台共交直流母线并联的DC/AC变换器进行建模得到带零序分量的等价平均值模型,如图12所示,经推导得两台变换器的零序电压差作用于输出电抗从而产生零序电流,因此论文在逆变器下垂控制基础上提出一种基于零序电压补偿的瞬时环流抑制策略,对单台DC/AC变换器的零序电压进行调节,使调节后的零序电压差接近于零,实现对零序环流的抑制作用,其原理图如图13所示。该策略控制效果较好,两台变换器独立控制,无互联通讯线,控制可靠性高,系统冗余性好,但该策略在设计上只针对两台DC/AC变换器并联的系统,未考虑多台DC/AC变换器并联的情况。

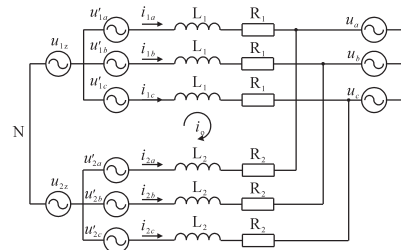


图12 并联逆变器带零序分量的等价平均值模型
Fig.12 Equivalent mean value model of parallel inverter with zero sequence component

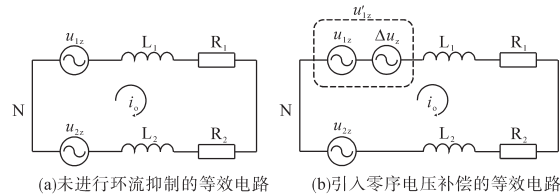


图13 零序电压补偿的瞬时环流抑制原理图
Fig.13 Schematic diagram of instantaneous circulating current suppression for zero sequence voltage compensation

文献[43]同时考虑共交直流母线并联系统的交叉环流与零序环流问题,在下垂加虚拟阻抗控制方法的基础上引入零序环流与交叉环流控制环,控制框图如图14所示。

图14中通过下垂控制计算每台逆变器的参考电压,虚拟阻抗对逆变器的输出阻抗进行调节,以弥补下垂控制对并联单元输出阻抗敏感的问题,下垂加虚拟阻抗控制可使各逆变器具有更好的均流性能,而交叉环流与零序环流控制利用两台逆变器输出电流坐标变换后dq0轴的电流差来补偿电流内环参考值,可有效抑制系统环流,但控制中需利用两台变换器的电流差值,变换器

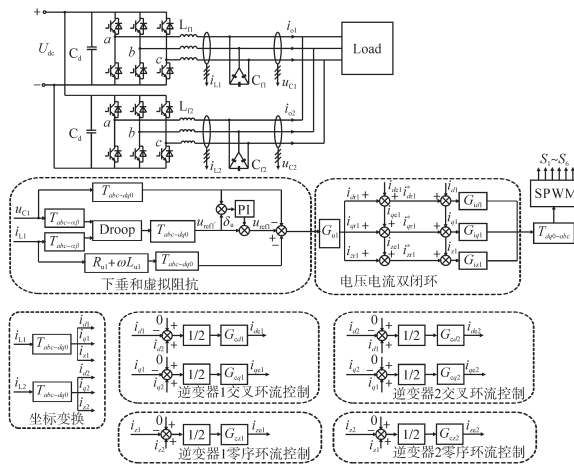


图14 交叉环流与零序环流抑制策略

Fig.14 Cross circulation and zero sequence circulation suppression strategy

间有通讯互连线,降低了系统可靠性。

除以上采用零序电压补偿及其改进策略来进行环流抑制的方案外还有一些学者对调制策略进行改进以达到零序环流抑制的效果,文献[44]建立了DC/AC变换器并联的开关周期平均模型,指出零序环流与两台逆变器的零序占空比之差及变换器硬件参数有关,在采用SVPWM调制时,传统零序环流抑制每个载波周期调节一次零矢量作用时间,在此基础上文献[44]提出每个载波周期调节两次零矢量作用时间,并提出一种通过各变换器输出瞬时功率反馈来调节变换器负载功率的自适应功率均分控制方法,较之传统环流抑制方法具有更好的实时性,且实现了负载功率均分。文献[45]推导并联模块零序电压相同或无零序电压时,系统环流为零;当各模块零序电压不一致时所引起的环流增量与开关周期内零序电压差成正比,为此提出一种SPWM与SVPWM混合的HPWM调制方法,该方法能提高直流电压利用率,可有效抑制并联变换器间的低频零序环流,系统无互连线,在理论上没有并联台数的限制。

文献[29]中四台双向DC/AC变换器共交直流母线并联运行,其位置集中,采用共载波共调制波集中式控制,保证各变换器开关管同步动作。相比分布式控制,集中式控制简单,可有效抑制开关动作不一致造成的环流问题,四台变换器主电路采用相同结构参数,避免由硬件参数不同造成的环流问题,在实际运行中环流仅占系统输出电流的2%,抑制效果明显。

对以上几种共交直流母线并联逆变器环流

抑制技术进行总结对比,其各自特点如下:硬件方法:1)加装隔离变压器,可阻断环流通道、增大系统体积成本、损耗大;2)串联高阻抗耦合电感,可有效抑制中、高频环流,低频环流抑制效果不佳,增加控制难度。软件方法:1)基于零序电压补偿的零序环流抑制,并联单元无互联信号线、可靠性强、环流抑制效果好、控制系统复杂;2)改进调制策略,实时性好、无互联信号线、无并联台数限制;3)集中式控制,控制简单、环流抑制效果好、系统冗余性差、受安装距离限制。

4 展望

柔性变电站相关研究尚处于起步阶段,但柔性变电站中大量电力电子装置具有冲击性、非线性、不平衡性特征,必然会带来诸多电能质量新问题,如电压快速波动、三相不平衡更频繁、间谐波、超高频谐波分量大幅增加、变换器与电网,变换器与变换器之间交互作用更加强烈、频繁和复杂,因此,研究柔性变电站电力电子化所带来的电能质量新问题及柔性变电站中变换器相应控制技术将成为未来研究重点。此外,随着半导体器件的发展,基于宽禁带材料的碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)等新器件具有导通压降小、耐高温高压、开关频率高等优点,其应用将逐渐替代传统硅材料器件,基于宽禁带材料的新器件应用于柔性变电站将从本质上提高系统容量及性能。

参考文献

- [1] 翁爽. 未来电网更具柔性化特征—专访国网智能电网研究院院长滕乐天[J]. 国家电网, 2015, 9(146): 47-49.
- [2] 赵雅君. 工程|世界首个柔性变电站成功并网运行[EB/OL]. (2018-01-23) [2019-06-4]. http://www.cpn.com.cn/zdyw/201801/t20180123_1047017.html?from=timeline&isappinstalled=0%EF%BC%8E.
- [3] 世界首个柔性变电站成功并网运行[EB/OL]. (2018-01-24) [2019-06-4]. http://www.sohu.com/a/218654473_648206.
- [4] 张爱萍, 陆振纲, 宋洁莹, 等. 应用于交直流配电网的电力电子变压器[J]. 电力建设, 2017, 38(6): 66-72.
- [5] Abdelsalam A A, Gabbar H A, Sharaf A M. Performance enhancement of hybrid AC/DC microgrid based D-FACTS[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63(1): 382-393.
- [6] 傅守强, 高杨, 陈翔宇, 等. 基于柔性变电站的交直流配电网技术研究与工程实践[J]. 电力建设, 2018, 39(5): 46-55.
- [7] 周京华, 吴杰伟, 陈亚爱, 等. 张北阿里云数据中心柔性直流输电系统[J]. 电气应用, 2019, 38(1): 54-58.
- [8] 郑乔华. 柔性变电站及交直流电网源荷储经济调度方案研

- 究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [9] 李晨曦. 柔性变电站出线保护方案研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [10] Wang Z, Ouyang J, Zhang J, *et al.* Resonant power electronic transformer for power grid[C]// Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE), Pittsburgh: IEEE, 2014: 4531-4536.
- [11] 张科科, 齐磊, 崔翔, 等. 多绕组中频变压器宽频建模方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 582-590.
- [12] Tong Y, Zhang H, Jing L, *et al.* Flexible substation and its control for AC and DC hybrid power distribution[C]// 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Wuhan: IEEE, 2018: 423-427.
- [13] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.
- [14] 陈东, 张军明, 钱照明. 带LCL滤波器的并网逆变器单电流反馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 10-16.
- [15] Ye Y, Wu Y, Xu G, *et al.* Cyclic repetitive control of CVCF PWM DC-AC converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9399-9409.
- [16] 侯立军, 庞仁杰, 刘馨芳, 等. 微网储能逆变器并联下的零序环流控制[J]. 电气传动, 2017, 47(3): 32-36.
- [17] 聂志强, 梁晖, 罗浩, 等. 基于非线性下垂控制的单模式微网并/离网无缝切换技术[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1371-1378.
- [18] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 707-720.
- [19] Zhou H, Li Y W, Zargari N R, *et al.* Selective harmonic compensation (SHC) PWM for grid-interfacing high-power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1118-1127.
- [20] Briz F, Garcia P, Degner M W, *et al.* Dynamic behavior of current controllers for selective harmonic compensation in three-phase active power filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1411-1420.
- [21] Liu Y, Zhao J, Geng T. Generalized predictive control-based selective harmonic compensation scheme for active power filters [C]// 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Hangzhou: IEEE, 2014: 803-807.
- [22] Sun X, Zeng J, Chen Z. Site selection strategy of single-frequency tuned R-APF for background harmonic voltage damping in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 135-143.
- [23] 张树全, 戴珂, 谢斌, 等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 55-62.
- [24] 付子义, 董彦杰. 不平衡电网下模块化APF分序并联控制策略[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-7[2019-06-20]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000219>.
- [25] He J, Li Y W. Hybrid voltage and current control approach for DG-grid interfacing converters with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1797-1809.
- [26] Lascu C, Asiminoaei L, Boldea I, *et al.* Frequency response analysis of current controllers for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 337-347.
- [27] 杨君. 有源电力滤波器网侧谐波电流控制技术研究[D].武汉: 华中科技大学, 2014.
- [28] 汪玉凤, 高小朋, 郑军辉, 等. 基于VPI控制器选择性谐波电流控制策略[J]. 电力电子技术, 2015, 49(4): 74-77.
- [29] 周京华, 张荣, 陈亚爱, 等. 张北数据港柔性变电站DC/AC变流器关键控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 128-134, 1-5.
- [30] 王恒利, 付立军, 肖飞, 等. 三相逆变器不平衡负载条件下双环控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 398-404.
- [31] 段晓丽, 罗耀华, 游江, 等. 基于阻抗分析的三相逆变器负载不平衡控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 56-62.
- [32] 周京华, 崔岸伟, 章小卫, 等. 电网电压不平衡条件下的三相PWM整流器控制[J]. 电气传动, 2015, 45(5): 39-45.
- [33] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 241-246.
- [34] Loh P C, Tang Y, Wang P, *et al.* Complex-vector time-delay control of power converters[C]// IEEE Industry Applications Society Meeting. IEEE, 2008: 1-8.
- [35] 韦微, 茹心芹, 石伟, 等. 适用于不平衡负载工况下的微网逆变器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 76-82.
- [36] 姚骏, 谭义, 杜红彪, 等. 孤岛模式下逆变器并联系统的谐振特性分析及其抑制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 199-210.
- [37] 陈燕东, 罗安, 龙际根, 等. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒下垂多环控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 18-29.
- [38] Zhang P, Zhang G. Circulating current suppressing in modular parallel photovoltaic grid-connected inverter[C]// IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. IEEE, 2016: 1-6.
- [39] Li Y, Yang X, Chen W, *et al.* Research on zero-sequence circulating currents in parallel three-level grid-tied photovoltaic inverters[C]// 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, 2016: 1-6.
- [40] Bella S, Djerioui A, Houari A, *et al.* Model-free controller for suppressing circulating currents in parallel-connected inverters [C]// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Portland: IEEE, 2018: 1-6.
- [41] 张学广, 陈佳明, 张文杰, 等. 并联三相PWM变换器零序环流带宽扩展[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 69-75.
- [42] 肖华根, 罗安, 王逸超, 等. 微网中并联逆变器的环流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3098-3104.
- [43] Wei B, Guerrero J M, Vasquez J C, *et al.* A circulating current suppression method for parallel connected voltage-source-inverters (VSI) with common DC and AC buses[C]// Energy Conversion Congress & Exposition, IEEE, 2017: 1-6.
- [44] 马璐, 刘莉, 雷蕾, 等. 并联三相逆变器环流的双变零矢量控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 74-81.
- [45] Jiang W, Ma W, Wang J, *et al.* Suppression of zero sequence circulating current for parallel three-phase grid-connected converters using hybrid modulation strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3017-3026.

收稿日期:2019-06-04

修改稿日期:2019-07-12