

柔性互联交流配电网的换流器并离网统一控制策略

袁志昌¹, 魏应冬¹, 刘文华¹, 马慧远², 于希娟², 郭佩乾¹

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要:提出一种并离网统一控制策略,在孤岛控制模式的基础上设计了主动功率调节功能,并网运行时按照有功-电压平方下垂的关系自动分配有功功率;离网运行时下垂功率控制自动切换成定交流电网频率和电压的孤岛模式。该方法适用于并网和离网2种不同的运行工况,并且省去了孤岛检测环节,大幅简化了控制系统结构。以四端柔性互联交流配电网系统为例,详细分析了并离网统一控制策略的参数设计方法,并建立电磁暂态仿真模型,针对并离网多种不同工况开展仿真。仿真结果表明,所提方法可以满足柔性互联系统的负荷均衡及转供的性能要求,同时也避免了并离网切换过程的过电流。

关键词:电压源换流器;柔性互联交流配电网;协调控制;孤岛控制

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002010

0 引言

随着城市发展和用电负荷的快速增加,对配电网电能质量、供电可靠性和输电容量的要求日益提高。中低压配用电系统存在如下问题^[1-2]:①配电设备负载率低,设备冗余度大;②故障后供电恢复时间长;③区域内负载分布不均;④可再生能源的随机性影响配电系统稳定运行。

近年来,基于电压源换流器(VSC)的柔性直流技术在国内外获得快速发展,国外已投运柔性直流输电工程达十余项,2025年前规划的工程达百余项^[3-5]。柔性直流技术能够快速独立地控制有功功率和无功功率,不增加交流系统的短路容量,没有电磁环网问题,所以在中压配电网中利用柔性直流技术实现传统交流配电系统改造是主动配电网技术的一个重要方面,也是解决上述问题的有效手段^[3,6-8]。

在利用柔性直流技术改善交流配电网性能方面,英国学者最早提出基于VSC的软常开开关(SNOP)概念^[9-10],实现交流配电网的柔性互联。文献[11]则将基于模块化多电平换流器(MMC)的柔性直流技术应用于交流配电网柔性互联场合。文献[12]利用多个柔性直流换流器将若干回10 kV馈线柔性互联,形成交直流柔性环网系统,通过灵活控制交流潮流,实现多个馈线负荷的均衡,提高配电可靠性。文献[13]提出利用柔性直流换流器将多座110 kV变电站的10 kV母线互联,提高变电站的负载率,提升设备利用率,缩短故障停电时间。

然而,这些文献均未对柔性互联后的交直流系统控制问题展开讨论。在文献[11-13]的柔性互联方案中,多个柔性直流换流器构成了多端柔性直流

系统,其中直流侧线路较短^[13],或者仅设有公共直流母线而无直流线路^[11-12],这对直流系统的控制提出很高的要求。另外,当变电站或配电馈线发生故障失去电源时,柔性直流换流器需要快速切换至孤岛运行模式,孤岛状态检测的准确性和快速性对其控制性能有重要影响,增加了控制系统的设计难度。

在柔性直流换流器并网和离网的切换控制方面,国内外学者开展了大量研究。通常,并网控制采用dq轴矢量控制,而离网控制采用Vf控制,两者具有不同的控制结构和原理。文献[14]设计了一种根据相位偏移和频率变化判断是否形成孤岛以及切换并/离网模式的方法。文献[15]在舟山柔性直流工程基于电网相位和频率微增量的孤岛检测方法实现并网向离网切换。文献[16]在矢量控制中设置预同步控制器,减小并离网切换时的电流振荡。上述方法均基于孤岛检测结果,其结构比较复杂,性能受限于孤岛检测的准确性和快速性。

为了避免孤岛检测误差对并离网切换的影响,有学者提出并离网统一的控制策略。文献[17]提出了功率同步控制方式,将换流器当作同步发电机,控制其输出电压的频率、相位、幅值来实现并网控制以及功率调节。由于其不依赖对交流电网的锁相环节,因而在形成孤岛后可以自动适应离网运行的条件。文献[18-19]进一步完善了功率同步控制策略,增加电流环控制以及有功频率下垂控制,限制了短路电流并具备参与电网调频的功能。文献[20]成功将功率同步控制应用到风电机组中。文献[21]提出将矢量控制和功率同步控制集成,适应不同的电网强度和各种故障工况,但是其切换逻辑需要监测交流、直流侧故障类型和位置,增加了控制复杂度。

基于功率同步控制的方法可以自动适应离网并网的运行工况,无需孤岛检测环节,是一种简单且灵活的方法。然而已有文献提出的功率同步控制策略

收稿日期:2019-06-24;修回日期:2019-12-12

基金项目:国家电网公司科技项目(5202011600UH)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5202011600UH)

主要针对逆变站,未考虑直流电压的控制,其前提是整流站(采用常规的定直流电压矢量控制)能够有效控制直流电压。另外对多个端口的协调考虑不足,在多端直流系统的应用受限,尤其难以应用于多个端口地位对等、各端口的功率方向和并网状态灵活变化的柔性互联交流配电系统中。为此,本文提出一种适用于柔性互联交流电网的换流器并离网统一控制策略,以功率同步控制为基础,设计了有功功率随直流电压平方下垂的多端协调环节,使每个换流站都能控制直流电压,适用于对等的多端柔性直流系统。本文提出的方法大幅简化了控制器结构,省去了孤岛检测环节,适合柔性互联交流电网控制。

1 柔性互联交流电网的结构和运行方式

1.1 柔性互联交流电网的结构

柔性互联交流电网的核心是通过多个VSC将不同的变电站互联,实现潮流控制和互备供电。文献[11]提出的柔性互联交流电网的基本结构如附录A中图A1所示。馈线1—4分别来自4座变电站,每条馈线的末端接入1个VSC,4个VSC在直流端并联接入同一条直流母线,形成4座变电站柔性互联。文献[12]提出的柔性互联交流电网如附录A中图A2所示,每座变电站的10 kV母线上安装1个VSC,4个VSC之间通过直流线路连接在一起,相比于图A1,图A2中的直流线路具有接入直流电源或负荷的能力,提供直流配电功能,灵活性更高。

1.2 柔性互联交流电网的运行方式

柔性互联交流电网主要包括如下典型方式。

1.2.1 日常运行方式

日常运行方式指的是交流配电网未发生故障、换流器也全部正常运行的情况,是在绝大多数时间的运行方式。在此方式下,柔性互联交流电网可以根据电网需求提供以下控制功能。

(1) 配电分区负载率均衡。当互联的各个变电站或馈线负载存在较大差异时,往往出现部分分区负载接近最大值而其余分区轻载的情况。此时,可以通过VSC从轻载分区向重载分区传送功率,使各个分区负载率均衡。从而延缓设备的升级改造需求,提高整个互联区域的供电能力,实现经济运行和高稳定裕度运行。下面介绍该功能的具体实现方法。

在各条馈线的电源端监测该馈线实时负荷,记为 P_{Li} ($i=1, 2, \dots, N$), N 为互联的馈线数,则该互联区域的平均负荷为:

$$P_{avg} = \sum_{i=1}^N P_{Li} / N \quad (1)$$

对于第 i 条馈线,为了达到平均负载率,与其连接的换流器需要向馈线注入的有功功率为:

$$P_{refLi} = (K_{pa} + K_{ia}/s)(P_{Li} - P_{avg}) \quad (2)$$

其中, K_{pa} 和 K_{ia} 分别为比例和积分系数。将上述功率

指令发送到各个换流器的控制器中,可以实现互联配电分区负载率均衡。

(2) 波动性电源功率均摊。在配电网中,分布式电源日益增加,由于其功率具有随机波动性,给配电网的正常运行带来严重影响。基于VSC柔性互联的多个分区可以实现波动性电源功率的均摊互济,减小分布式电源集中接入某一变电站产生的影响,有利于提升配电网消纳可再生能源能力。

(3) 提供动态无功补偿功能。VSC可以向变电站提供动态无功补偿,根据无功负荷变化情况动态调节变电站母线电压水平,提升交流电网电压控制能力,提高配电网的电压质量。

1.2.2 负荷转供运行方式

假设互联的某个配电分区发生故障导致失去电源,柔性互联交流电网将转成负荷转供运行方式,提供负荷转供功能。在此方式下,与故障分区相连的VSC快速切换至孤岛运行模式,向该分区持续提供电力,所需功率通过其他VSC从交流电网获取。以馈线变电站4发生故障为例,图1为负荷转供运行方式的示意图。日常运行方式下馈线4的负荷主要由变电站4提供,故障后变电站与馈线之间的断路器跳开,馈线4的负荷转由VSC₄提供。由于VSC可以在数十毫秒内完成并网模式到离网模式的切换,当某个配电分区发生故障导致主变失电后,该分区的负荷可以在数十毫秒内转由其他配电分区提供,大幅缩短了故障停电时间,提高了配电可靠性。

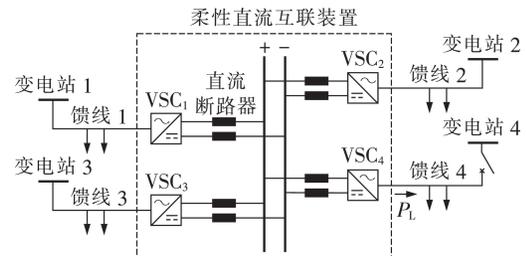


图1 馈线4负荷转供运行方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of load shifting operation method for Feeder 4

1.2.3 部分换流器故障方式

部分换流器故障方式是指部分VSC发生故障。此时,无故障的换流器维持正常运行,可以提供负载率均衡、波动性电源功率均摊、动态无功补偿等功能,但是由于换流器数量减少,提供的功率数量相比正常运行方式有所降低。

2 柔性互联交流电网并离网统一控制策略

由柔性互联交流电网的拓扑结构可知,多个交流配电分区通过VSC柔性互联,多个VSC之间的协调控制是决定系统稳定运行的基础。由于直流系统中功率平衡的指标是直流电压,当传递到直流网

络中的功率过剩时,直流电压增大;当功率不足时,直流电压减小。因此,为了维持系统电压稳定,即保持系统功率平衡,通常将电压控制与功率控制配合使用。目前在多换流器协调控制领域,常用的协调控制策略主要包括主从式和下垂式 2 种,其结构可参见附录 B 中图 B1、B2。

无论是主从式控制还是下垂式控制,当与某个换流器连接的交流系统发生故障并失去电源后,该换流器需要切换到孤岛控制模式,为交流系统的负荷提供电源。换流器的孤岛控制器结构如图 2 所示,换流器输出的交流电压幅值和频率为额定值。图中,PWM 为脉冲宽度调制环节; U_{aref} 、 U_{bref} 、 U_{cref} 为三相交流电压参考值; U_{ac} 、 U_{acref} 分别为交流电压及其参考值; K_{pi} 、 K_{iu} 为换流器输出交流电压幅值的比例积分(PI)调节参数,通常根据期望的交流电压动态响应特性选取; U_d 、 U_q 、 θ_{ref} 分别为 VSC 输出电压的 d 、 q 轴分量及其相位; ω_0 为额定角频率。

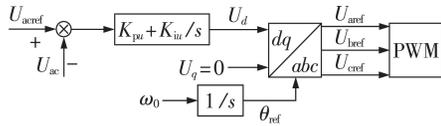


图 2 孤岛站 VSC 控制器结构

Fig.2 Control structure of VSC under islanding

对比图 2 和附录 B 中主从式及下垂式控制器结构可知,孤岛控制器与主从及下垂式控制器差异较大,因此切换到孤岛控制模式时,控制系统会发生较大变化。另一方面,孤岛检测的快速性、准确性对孤岛切换的性能也有重要影响。孤岛检测不准确或不及时将引起误切换及换流器过流闭锁,中断系统运行。

2.1 本文方法

为了解决这个问题,本文提出一种并离网统一控制策略,采用该控制策略的 VSC 可自动适应交流电网并网或孤岛运行 2 种工况,无需孤岛检测,避免切换过程的过流,简化控制系统结构,提高可靠性。

本文提出的并离网统一控制策略如图 3 所示。图中, U_{dc} 、 U_{dceref} 分别为直流电压及其参考值; ω_{max} 、 ω_{min} 分别为角频率上、下限; P 、 P_{ref} 分别为有功功率及其参考值; K_{DC} 为输出功率随直流电压平方的下垂斜率系数; K_{pi} 、 K_{ip} 为换流器输出功率值的 PI 调节参数。

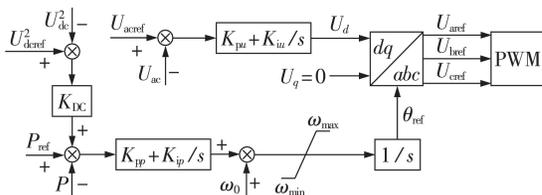


图 3 并离网统一控制器结构

Fig.3 Structure of universal controller under connecting or islanding

基本的控制原理与图 2 的孤岛控制器相似,VSC 主动控制输出电压的 dq 轴分量 U_d 、 U_q 及其相位 θ_{ref} 。其中 U_d 的控制目标是通过 PI 环节调整输出交流电压的幅值达到设定值 U_{acref} ; U_q 设定为 0; θ_{ref} 决定其输出有功功率的大小,该环节主要包含一个对有功功率做反馈调节的 PI,该 PI 的输入端设计了一个输出功率随直流电压平方变化的下垂控制策略。根据以上控制器计算得到的 U_d 、 U_q 、 θ_{ref} 经过派克反变换得到换流器三相输出电压参考值,发送至 PWM 环节。

图 3 所示控制器可以自动适应孤岛运行的需求,而为了满足并网运行的需求,该控制策略还需要其能够主动调整输出功率,该项功能通过改变 VSC 的输出电压频率和相位来实现。VSC 输出的角频率 ω 是调节输出功率的关键控制量。当 $\omega > \omega_0$ 时,VSC 输出电压相位超前交流电网相位,提升输出交流电网的功率;当 $\omega < \omega_0$ 时,可降低输出功率。

另一方面,为了避免主站与从站控制策略切换过程的弊端,考虑换流器净输入功率与电容能量的动态特性^[22],在图 2 控制器结构中引入输出功率随直流电压平方变化的下垂控制策略,其计算公式为:

$$\omega = \omega_0 + (K_{pp} + K_{ip}/s) [P_{ref} + K_{DC}(U_{dc}^2 - U_{dc}^2) - P] \quad (3)$$

并网运行时,在积分环节的作用下,达到稳态时,输入误差项应等于 0,这意味着 VSC 的输出功率与直流电压平方满足如下关系:

$$P - P_{ref} = -K_{DC}(U_{dc}^2 - U_{dc}^2) \quad (4)$$

根据式(4),稳态时,各个 VSC 的输出功率随直流电压平方变化的下垂控制策略如图 4 所示。各个 VSC 均采用自动下垂控制策略,输出功率可以在互联的换流器之间按照下垂特性自动分配,无需区分主站和从站,从而省去了统一的协调控制器,简化控制架构,提高系统的扩展能力。

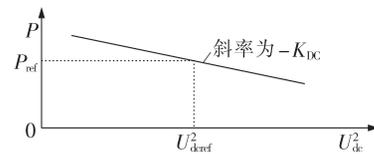


图 4 所提控制策略的有功-电压平方下垂特性

Fig.4 Power-voltage square droop characteristic of proposed control strategy

当与某个 VSC 连接的交流系统发生故障并失去电源时,图 3 所示的控制策略会自动转化成孤岛控制模式,此时,VSC 输出的交流电压幅值和频率均为额定值,而输出功率取决于交流侧负荷的大小。当交流负荷与故障前 VSC 输出功率相差越大时,在有功-电压平方下垂特性的作用下,VSC 的直流电压与额定值的偏差也越大。设计时,需要根据各个换流器的额定容量、稳态运行功率、交流分区负荷的情况合理设定各个 VSC 的下垂斜率,以确保系统在自动

切换到孤岛控制模式时不会因为直流电压偏离额定值过大影响系统正常运行。

2.2 控制参数设计方法

在图3所示并离网统一控制器中,主要参数包括 K_{DC} 、 K_{pu} 、 K_{iu} 、 K_{pp} 、 K_{ip} 、 ω_{min} 及 ω_{max} 。当互联系统出现功率波动时,新增功率根据各换流器的下垂斜率分配,因此,其参数设计应考虑各换流器容量大小、最大允许直流电压偏差等因素设计,本文中各个换流器容量相同,因此选取 $K_{DC}=2$,当换流器输出功率偏离额定值10%时,直流电压偏离额定值约为2.5%。

K_{pp} 、 K_{ip} 的设计过程需要考虑2个方面的因素:当功率参考值发生变化时,换流器响应速度取决于该PI环节的增益,增益越高,输出功率阶跃响应越快;当交流系统频率发生波动时,该PI环节决定了换流器跟踪交流频率的动态特性。由于控制器中角频率参考值 ω_0 选取为电网额定角频率314 rad/s。当交流电网频率波动偏离50 Hz时,换流器功率在频率变化时刻也会波动,产生的功率偏差经过积分器后形成稳定的频率偏差,使得换流器最终输出的频率值自动跟踪上交流电网频率。至稳态时可以消除输入的功率差,保证换流器输出功率回调至参考值 P_{ref} ,然而在动态调整的过程中,如果比例系数 K_{pp} 过大,可能引起较大功率振荡。实际应用中应该综合上述2个方面的因素,兼顾增益值和功率振荡的限制选取合理的参数。本文选取 $K_{pp}=5$ 、 $K_{ip}=100$,由仿真结果可知,功率阶跃响应时间约为10 ms,而频率跟踪的响应时间约为200 ms。

当交流侧故障导致失去交流电源时,换流器自动进入孤岛运行模式,其输出功率取决于交流侧配电负荷。由于此时控制器功率参考值 P_{ref} 保持不变,可能出现实际输出负荷 P 与参考值 P_{ref} 相差较大的情况,在PI调节器的作用下导致换流器输出频率偏离额定频率。针对这个问题,控制器在输出频率环节设置了限幅器,其目的是通过设定频率上限 ω_{max} 和下限 ω_{min} ,确保在离网运行时,输出频率不会超出配电网允许的频率偏差。根据我国电网运行规程,可以选取 $\omega_{min}=311.0$ rad/s、 $\omega_{max}=317.3$ rad/s。另一方面,离网运行不是长期状态,只是应对电网故障时的短时连续供电。待交流电网故障排除后,可以恢复并网运行,换流器频率也可恢复正常值。

3 仿真验证

3.1 仿真模型和参数

为了验证本文所提的控制策略,在PSCAD/EMTDC中建立了图A1所示四端柔性互联交流配电网,通过共用直流母线的VSC将4条10 kV馈线在末端柔性互联,VSC的直流电压为 ± 10 kV,各条配电线的负荷、VSC的容量以及控制器主要参数见表1。

表1 仿真系统主要设备参数

Table 1 Main parameters of simulation system

参数	数值	参数	数值
馈线1负荷/MW	8	VSC ₁ 容量/(MV·A)	10
馈线2负荷/MW	9	VSC ₂ 容量/(MV·A)	10
馈线3负荷/MW	6	VSC ₃ 容量/(MV·A)	10
馈线4负荷/MW	5	VSC ₄ 容量/(MV·A)	10
U_{dref} /kV	20	U_{acref} /kV	10
K_{pu}	0.8	K_{pp}	5
K_{iu}	10	K_{ip}	100
K_{DC}	2		

3.2 负荷均衡控制仿真

利用VSC的功率控制能力可以在互联的各个配电分区实现主动潮流控制,使各分区的负载率均衡。图5给出的是这种控制功能的仿真结果,其中上图为各个分区的负荷曲线,下图为VSC输出功率曲线(以流入交流侧为功率正方向)。稳态时,馈线1—4各自承担本分区的负荷,负载率各不相同,此时各个VSC均处于零功率备用状态。当 $t=1$ s时,投入负荷均衡控制功能,与重载馈线相连的VSC₁和VSC₂向交流侧送出功率,这些功率来自于与轻载馈线相连的VSC₃和VSC₄。可以看出,经过1 s后,各条馈线的负荷均达到7 MW,处于均衡状态。这意味着在重载馈线1和馈线2,仍然可以进一步增加负荷,提升了互联配电区域的总体供电能力。

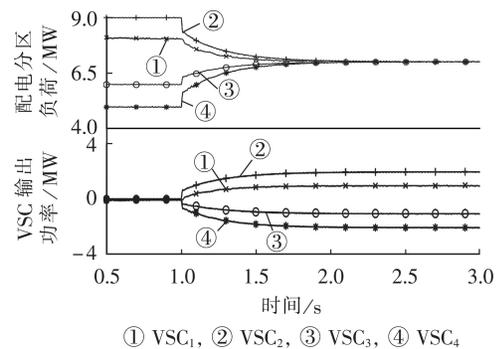


图5 负载均衡控制仿真曲线

Fig.5 Simulative curves of load balancing control

3.3 功率动态阶跃仿真

阶跃响应是考察控制器性能的重要指标,图6为并离网统一控制策略的有功阶跃响应曲线。阶跃前,VSC₁—VSC₄的输出功率分别为5.3、1.6、-3、-4 MW。当 $t=3$ s时,VSC₂的有功功率指令提升为8 MW,由仿真曲线可知,在10 ms内,VSC₂的输出功率提升至90%阶跃量以上,随后继续上升,在500 ms后达到稳态值。由于并离网统一控制策略具有有功功率—直流电压平方的下垂关系,属于有差调节,VSC₂提升的功率按照下垂斜率的关系分配到其余各个VSC。达到稳态VSC₁—VSC₄的输出功率分别为3.5、8、-5.5、-6 MW。阶跃过程中,直流电压从20.2 kV

降低到 19.2 kV,下降 5%。通常直流电压允许偏差额定值的范围在 $\pm 10\%$,因此,功率阶跃过程电压偏差不会触发保护动作。

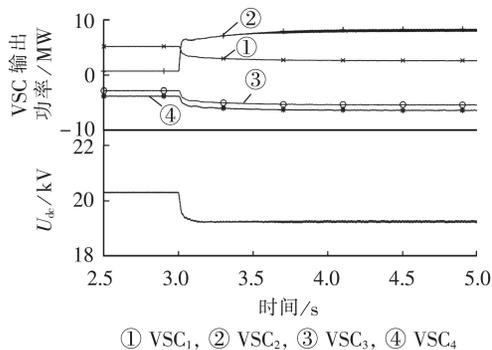


图 6 功率阶跃响应仿真曲线

Fig.6 Simulative curves of power step response

3.4 负荷转供控制仿真

当柔性互联的配电分区出现故障时,其余分区可以通过 VSC 向故障分区提供电力缺额,维持负荷持续供电,这是柔性互联交流配电网的核心优势之一。为了对比主从式、下垂式、并离网统一式 3 种方法在负荷转供控制中的区别,本节给出上述 3 种方法仿真结果对比。在主从式、下垂式控制方法中,为了准确判断是否形成孤岛,通常需要较长的检测和防误时间,本文选取 100 ms 延时作为孤岛检测时间。

故障前,柔性互联配电网运行在负荷均衡控制模式,VSC₁—VSC₄ 的出力分别为 1、2、-1、-2 MW。当 $t=3$ s 时,馈线 2 发生故障引起电源侧断路器跳开,该分区的 9 MW 负荷转由 VSC₂ 提供。

图 7 给出了 3 种方法中 VSC₂ 输出电流的变化情况,由上至下分别为主从式、下垂式及并离网统一式控制方法下的三相电流波形。对比可知,在主从式和下垂式控制方法中,孤岛检测期间,由于交流侧已经失去电源,而 VSC 仍然运行在控制功率的模式,其

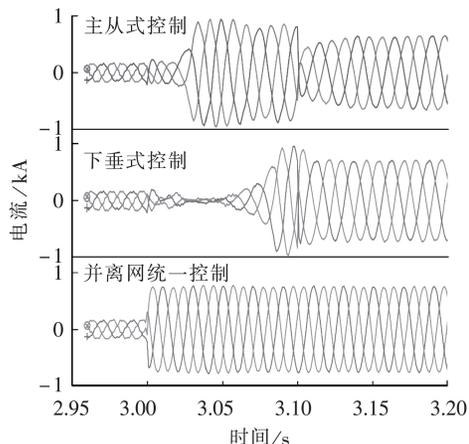


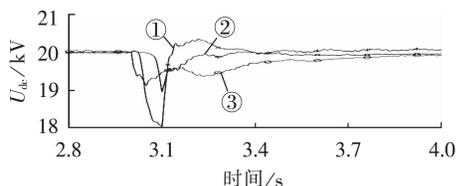
图 7 孤岛切换过程的 VSC₂ 输出电流

Fig.7 Output current of VSC₂ during islanding switch process

输出电流存在过渡过程,稳态时电流峰值为 0.77 kA,主从式控制过电流峰值约为 0.92 kA,而下垂式控制的过电流峰值约为 0.85 kA。直到 100 ms 后,主从式和下垂式控制方法中的 VSC₂ 切换到孤岛控制模式,其输出电流才能恢复至正常供电形态。而在并离网统一控制方法中,当 $t=3$ s 时,故障发生后,VSC₂ 的输出电流就快速阶跃至正常供电的工况(电流峰值为 0.77 kA),未出现过流。

附录 C 中图 C1 所示为 3 种控制方法下 VSC₂ 的输出功率。由图可知,主从式控制在切换过程中存在较大的过电流(约为额定值的 1.2 倍),完成孤岛检测后仍需要约 600 ms 才能达到稳定功率值 9 MW。而下垂式控制在故障发生后输出电流和功率先减小,待判定为孤岛后再提升。可见上述 2 种方法在故障后至完成孤岛检测这段时间内均无法稳定地为负载供电,过渡过程较长。在并离网统一控制中,故障后功率在 50 ms 左右即已达到稳态值 9 MW,且无明显超调,这体现了该方法在负荷转供过程中的优势。

图 8 为 3 种控制方法中直流电压的变化曲线。由图可知,孤岛切换过渡过程中,并离网统一控制方法的直流电压跌落程度最小,而主从式方法的直流电压跌落最大。由于下垂式控制和并离网统一控制具有功率-电压下垂特性,输出功率重新达到稳态后,两者的直流电压会偏离额定值,然而从仿真曲线看,电压偏离均在 0.5 kV 以内,满足运行规程。



① 主从式控制, ② 下垂式控制, ③ 并离网统一控制

图 8 孤岛切换过程的直流电压

Fig.8 DC voltage during islanding switch process

附录 C 中图 C2 为负荷转供过程中馈线 2 的负荷母线三相电压及其有效值波形。由图可知,当 $t=3$ s 时馈线 2 负荷由换流器转供。三相电压的过渡过程非常短暂,在数毫秒内即过渡到新的稳态,交流电压没有严重畸变。另外整个过渡过程中电压有效值调整未超过 2%。

3.5 交流电网频率波动对控制器的影响

并网运行时,3 s 时电网频率从 50 Hz 波动到 50.3 Hz,5 s 时电网频率从 50.3 Hz 波动到 49.7 Hz。图 9 由上至下依次为交流频率、换流器的输出功率以及直流母线电压的波形。在频率跳变时刻,换流器输出功率出现波动,主要由换流器与电网频差造成,此时该换流器输出功率的参考值仍是 $P_{ref}=0$,实际输出功率与参考值形成的功率偏差经过积分器

的作用后,快速产生频率偏差,叠加到50 Hz后,使得换流器输出频率跟踪电网频率。由于积分环节稳态的增益高,经过约0.2 s后,换流器输出功率回调至参考值。而直流母线电压仅在频率跳变时刻出现一个较小的波动,稳态后可恢复至额定值。

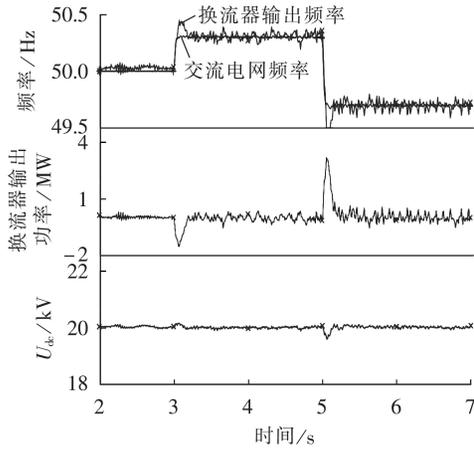


图9 交流频率波动的系统响应

Fig.9 Response of system characteristic under AC frequency fluctuation

3.6 并离网切换过程换流器输出频率

图10为VSC₂在并离网过程的输出频率曲线。设置 $\omega_{\min} = 49.5 \text{ Hz}$ 、 $\omega_{\max} = 50.5 \text{ Hz}$ 。 $t = 3 \text{ s}$ 时交流电网发生故障,换流器进入离网运行状态,VSC₂输出功率从2 MW变化到9 MW,由于实际输出功率(9 MW)与参考值(2 MW)存在差异,经PI调节后输出频率跌落到下限值49.5 Hz并持续运行。当 $t = 5 \text{ s}$ 恢复联网状态后,负荷频率可恢复至50 Hz。

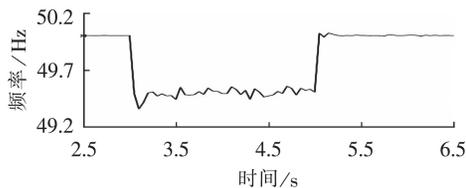


图10 并离网切换过程换流器输出频率

Fig.10 Output frequency of VSC during transition between connecting and islanding conditions

4 结论

在柔性互联交流配电网中,当配电分区发生故障失电后,该分区负荷可以经过VSC由其余分区快速转供,这是柔性互联带来的核心优势。然而,目前常用的主从式和下垂式控制方法在实现该功能时受限于孤岛检测的准确性和延时,容易出现过电流,且存在控制结构复杂,通信依赖度过高等问题。本文提出一种并离网统一式控制策略,其核心思想是为孤岛控制模式设计主动功率调节功能,使得其适用于并网和离网2种不同的运行工况,这样就省去了

孤岛检测环节,大幅简化了控制系统结构。由仿真对比可知,本文提出的并离网统一式控制策略在负载均衡控制、功率主动调节等稳态功能方面的性能满足工程应用需要,而在需要孤岛切换的负荷转供功能方面大大优于传统的主从式和下垂式控制策略。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 马钊,安婷,尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1552-1567.
MA Zhao, AN Ting, SHANG Yuwei. State of the art and development trends of power distribution technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6):1552-1567.
- [2] 袁博,邵华,贺春光,等. 智能配电系统规划关键问题与研究展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):65-73.
YUAN Bo, SHAO Hua, HE Chunguang, et al. Key issues and research prospects of smart distribution system planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):65-73.
- [3] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6791-6801.
- [4] 施静容,李勇,王姿雅,等. 交直流混合微电网互联变换器功率流动的柔性控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):107-113.
SHI Jingrong, LI Yong, WANG Ziya, et al. Flexible power flow control strategy for interlinking converter in AC/DC hybrid microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):107-113.
- [5] 李岩,罗雨,许树楷,等. 柔性直流输电技术:应用、进步与期望[J]. 南方电网技术,2015(1):7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation[J]. Southern Power System Technology, 2015(1):7-13.
- [6] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):9-19.
- [7] 彭克,张新慧,陈羽. 适用于多端柔性互联的交直流配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):22-27.
PENG Ke, ZHANG Xinhui, CHEN Yu. Power flow calculation algorithm for AC-DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):22-27.
- [8] 赵学深,彭克,张新慧,等. 多端柔性直流配电系统主从控制模式下的稳定性与优化控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):14-20.
ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Stability and optimal control of multi-terminal flexible DC distribution system under master-slave control mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):14-20.
- [9] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open point[C]//Proceedings of the 2010 IEEE PES general meeting. Minneapolis, USA:IEEE, 2010:1-8.
- [10] CAO W, WU J, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 164:245-257.

- [11] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):168-175. WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(22):168-175.
- [12] 黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):26-33. HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(9):26-33.
- [13] 王一振,赵彪,袁志昌,等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3551-3560. WANG Yizhen, ZHAO Biao, YUAN Zhichang, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(14):3551-3560.
- [14] 文安,邓旭,魏承志,等. 柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):99-106. WEN An, DENG Xu, WEI Chengzhi, et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(7):99-106.
- [15] 徐鹏坤,单晓晨. 基于光伏源的微电网孤岛/联网平滑切换控制[J]. 电子科技,2018,31(3):67-71. XU Pengkun, SHAN Xiaochen. A research on smooth switching between island and grid-connected operation mode based on microgrid with photovoltaic generations[J]. Electronic Science & Technology, 2018,31(3):67-71.
- [16] 王庆,卢宇,胡兆庆,等. 柔性直流输电系统孤岛运行方式下的故障电流抑制方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):56-61. WANG Qing, LU Yu, HU Zhaoqing, et al. Fault current suppression method for flexible DC transmission system operating in island mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(7):56-61.
- [17] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010,25(2):809-820.
- [18] GUAN Minyuan, PAN Wulue, ZHANG Jing, et al. Synchronous generator emulation control strategy for VSC(Voltage Source Converter) stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015,30(6):3093-3101.
- [19] 管敏渊,张静,刘强,等. 柔性直流输电系统的联网和孤岛运行通用控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(15):103-109. GUAN Minyuan, ZHANG Jing, LIU Qiang, et al. Generalized control strategy for grid-connected and island operation of VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(15):103-109.
- [20] MITRA P, ZHANG Lidong, HARNEFORS L. Offshore wind integration to a weak grid by VSC-HVDC links using power-synchronization control: a case study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,29(1):453-461.
- [21] 付强,杜文娟,王海风,等. 多端柔性直流输电中换流站的同步切换控制策略[J]. 电网技术,2018,42(4):1241-1250. FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Synchronous switching control strategy for VSC station in MTDC network[J]. Power System Technology, 2018,42(4):1241-1250.
- [22] 王炜宇,李勇,曹一家,等. 基于虚拟调速器的多端直流虚拟同步机控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(12):3461-3470. WANG Weiyu, LI Yong, CAO Yijia, et al. The virtual synchronous generator technology based on virtual governor for multi-terminal direct current system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(12):3461-3470.

作者简介:



袁志昌

袁志昌(1980—),男,江西吉安人,副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为柔性交流与直流输电技术(E-mail: yuanzc@tsinghua.edu.cn);

魏应冬(1979—),男,河南新乡人,讲师,博士,研究方向为电力电子技术、电能质量技术(E-mail: wyd@tsinghua.edu.cn);

刘文华(1968—),男,湖南长沙人,研究员,博士,研究方向为电力电子技术、柔性直流输电技术(E-mail: liuwenh@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Connecting and islanding universal control strategy for VSC of AC distribution grids

YUAN Zhichang¹, WEI Yingdong¹, LIU Wenhua¹, MA Huiyuan², YU Xijuan², GUO Peiqian¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: A universal control strategy suitable for connecting and islanding VSC is proposed, which appends active power regulator to typical islanding control strategy. Under AC connecting condition, active power of VSC is regulated according to droop relation between power and square DC voltage. When disconnected from AC grid, droop control is seamlessly transferred to islanding control mode with fixed AC voltage and frequency. This method is suitable for two different operating conditions of grid connected and off grid, and eliminates the islanding detection link, greatly simplifies the control system structure. Based on four-terminal VSC connecting AC distribution grids, the parameter design method of the universal control strategy is analyzed, and an electromagnetic simulation model is built in which the control performance of proposed strategy is validated. The simulative results show that the regulation characteristic of load balance and load shift under contingency is satisfactory while the over current during shift from connecting to islanding mode is avoided.

Key words: voltage source converter; VSC connecting AC distribution grids; coordinated control; islanding control

附录 A

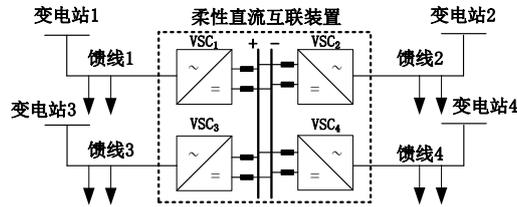


图 A1 集中安装的交流柔性互联配电网结构

Fig.A1 Structure of AC-DC flexibly connected distribution grid with lumped VSCs

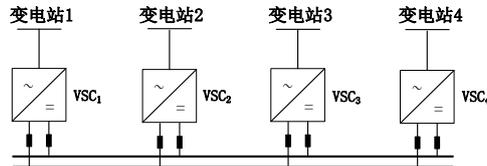
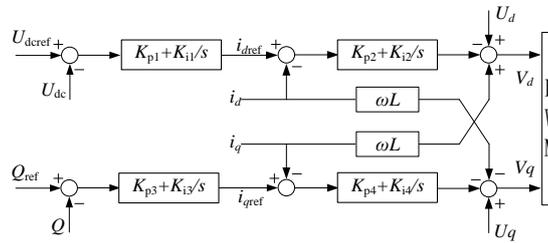


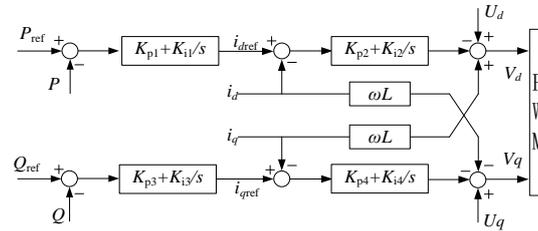
图 A2 分布安装的交流柔性互联配电网结构

Fig.A2 Structure of AC-DC flexibly connected distribution grid with distributed VSCs

附录 B



(a) 主站 VSC 控制器结构



(b) 从站 VSC 控制器结构

图 B1 主从式控制策略

Fig.B1 Control structure of slave VSC

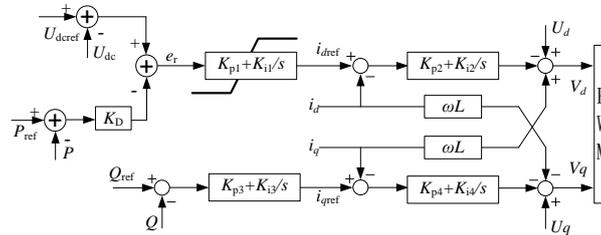


图 B2 下垂式 VSC 控制器结构

Fig.B2 Droop control structure of VSC

附录 C

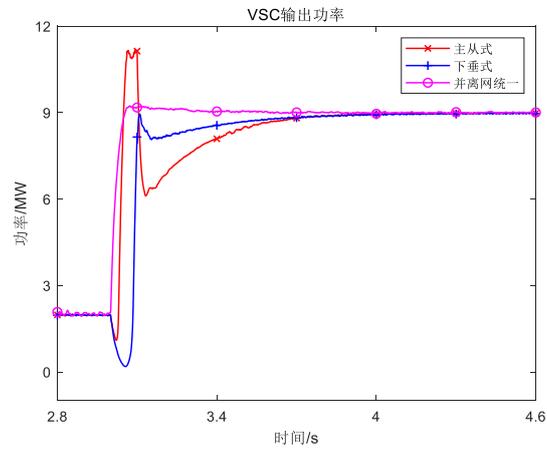


图 C1 VSC 输出功率 (负载转供方式)

Fig.C1 Output power of VSCs under load shifting

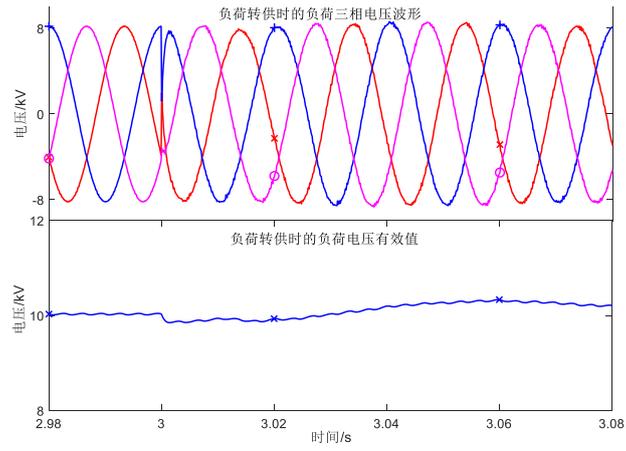


图 C2 孤岛切换过程的负载供电电压

Fig.C2 Load bus voltage during load shifting