无交流电容的构网型换流器电压电流比例控制及故障限流

管敏渊,沈建良,楼 平,来 骏,李 凡,王建锋 (国网浙江省电力有限公司湖州供电公司,浙江 湖州 313000)

摘要:通过引入电压电流比例关系,构建了适用于高压构网型换流器的无电容矢量电压控制,可与传统内环 电流控制组成构网型换流器级联控制架构,保留正序电流限幅和负序电流抑制能力,防止换流器在电网故障 时发生过流闭锁和损坏。与传统外环电压控制不同,该电压电流比例控制不依赖于交流侧并联容性滤波器 的电气关系构建,适用于无交流电容的高压构网型换流器的外环电压控制。通过选取特定的交流电压频率 指令值,构网型换流器可实现恒电压运行或虚拟同步机运行。时域仿真结果表明,所提高压构网型换流器控 制在电网故障时可自动实现换流器的负序电流抑制和故障穿越功能,避免换流器过流闭锁及损坏,并在故障 清除后恢复正常运行。

 关键词:无电容矢量电压控制;跟网型;构网型;换流器;电压电流比例控制;虚拟同步机;故障穿越;不对称

 中图分类号:TM46
 文献标志码:A

 DOI:10.16081/j.epae.202211018

0 引言

随着直流输电、柔性交流输电、分布式能源发 电、储能等需求的快速增长[1-3],电力电子换流器在 电网中应用越来越普遍。跟网型换流器输出交流电 压通过锁相环(phase locked loop, PLL)与交流电网 同步,并按指令与电网进行有功和无功功率交换。 基于内环电流控制器,跟网型换流器可以对输出交 流电流进行快速调节和限幅控制:另外,在电网不对 称运行时,通过加入负序电流控制器,可以抑制负序 电流,维持三相电流平衡[45]。由于换流器耐受过电 流能力有限,内环正、负序电流控制器的快速电流控 制能力可以防止换流器在电网扰动时发生过流闭锁 及损坏,对于保障换流器安全运行具有重要意义。 但是,跟网型换流器也存在若干不足。首先,跟网型 换流器的运行依赖于交流同步电源,在无源电网或 弱电网条件下可能无法正常运行[6-8]。其次,跟网型 换流器特性与传统同步发电机特性差异较大,随着 换流器容量占比的提升,如果不采取针对性措施,则 将弱化交流电网的惯性特征和调频能力[9],不利于 电网稳定运行。

近年来,在发展100%可再生能源电网的趋势下,不依赖于交流同步电源,可以自主运行的构网型换流器逐渐得到重视^[10-12]。跟网型换流器和构网型换流器的主要差异在于控制系统及相应运行模式,两者的硬件结构是相同或相似的。结合内环电流控制器和外环电压控制器的级联控制架构已成为构网型换流器的主流控制架构。该架构除可实现构网电压的自主构建,还保留了内环电流控制器,防止换流器过流闭锁和损坏。低压构网型换流器中的传统*dq*

收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-04-20 在线出版日期:2022-11-22 外环电压控制基于换流器交流侧并联容性滤波器的 充放电特性来构建交流电压^[13]。文献[14]在此基础 上,引入负序分量控制,使构网型换流器具备电网不 对称故障穿越能力。文献[15-16]加入了构网型换 流器的交流频率指令调节,使换流器能够模拟同步 发电机的惯性特征和调频能力。

另一方面,随着模块级联型多电平换流器作为 高压大容量换流器的广泛应用,换流器的输出电平 数可达到数十甚至上百^[17-18],其输出交流电压和电 流谐波含量较小,无需安装交流侧高压并联容性滤 波器就可满足并网要求^[19],降低系统成本。这样,低 压构网型换流器的传统 dq 外环电压控制无法直接 应用于无交流并联容性滤波器的高压构网型换流 器,需要研究适用于高压构网型换流器的新型外环 电压控制。本文提出了电压电流比例控制作为高压 构网型换流器的新型外环电压控制器,其电压控制 原理不依赖于换流器交流侧并联容性滤波器,并且 能够与内环电流控制器构成级联控制架构。另外, 可使用内环正序电流控制器对近序电流进行限幅, 使用内环负序电流控制器对负序电流进行抑制,避 免换流器在电网故障条件下发生过流闭锁及损坏。

1 传统 dq 矢量控制

1.1 低压构网型换流器系统

图1为向无源网络供电的低压构网型换流器的 系统结构图。图中: v_{abc} 和 i_{abc} 分别为低压构网型换流 器输出的三相交流电压和三相交流电流; u_{abc} 为低压 构网型换流器公共连接点(point of common coupling, PCC)处的三相交流电压; i_{Labc} 为并联电容器网 侧输出的交流电流;L和R分别为换流电抗器的等值 电感和等值电阻;C为并联滤波器的等值电容; U_{d} 和 I_{d} 分别为低压构网型换流器的直流电压和直流电 流。低压构网型换流器可采用低成本的两电平或三 电平换流器,由于输出电平数较少,需要应用高频脉 宽调制策略。为滤除低压构网型换流器输出的高次 谐波,一般需使用LC型低通滤波系统。



图1 低压构网型换流器系统拓扑

Fig.1 Topology of low-voltage grid-forming converter system

低压构网型换流器系统的电压、电流关系可以 表示为:

$$L \mathrm{d}\boldsymbol{i}_{\mathrm{abc}} / \mathrm{d}\boldsymbol{t} = -R\boldsymbol{i}_{\mathrm{abc}} + \boldsymbol{v}_{\mathrm{abc}} - \boldsymbol{u}_{\mathrm{abc}} \tag{1}$$

通过 dq 坐标变换,低压构网型换流器的正序电 压和电流可以用式(2)和式(3)所示的正序 dq 轴分 量来表示,换流器的负序电流和电压可以用式(4)和 式(5)所示的负序 dq 轴分量来表示^[4]。

$$(sL+R)i_{d}^{+}=v_{d}^{+}-u_{d}^{+}+\omega Li_{q}^{+}$$
(2)

$$(sL+R)i_{a}^{+}=v_{a}^{+}-u_{a}^{+}-\omega Li_{d}^{+}$$
 (3)

$$(sL+R)i_{d}=v_{d}-u_{d}-\omega Li_{a}^{-}$$
(4)

$$(sL+R)i_{a}^{-}=v_{a}^{-}-u_{a}^{-}+\omega Li_{d}^{-}$$

$$(5)$$

式中:s为拉普拉斯算子; ω 为电网额定角频率; v_a^* 、 v_q^* 和 i_a^* 、 i_a^* 分别为换流器输出正序交流电压和正序交流 电流的d、q轴分量; u_a^* 、 u_q^* 分别为PCC处正序交流电 压的d、q轴分量; v_a^- 、 v_q^- 和 i_a^- 、 i_q^- 分别为换流器输出负 序交流电压和负序交流电流的d、q轴分量; u_a^- 、 u_q^- 分 别为PCC处负序交流电压的d、q轴分量。

低压构网型换流器的控制功能是要对交流电压 进行控制。传统 dq 矢量控制为级联控制结构,如图 2 所示。其中内环电流控制用于对低压构网型换流 器输出电流进行调节;外环电压控制用于对低压构 网型换流器网侧电压进行调节;外环电压控制的输 出量作为内环电流控制的输入电流指令值。





1.2 **内环电流控制** 由于换流变压器通常采用Y/△接法,当交流 电网发生不对称故障时,换流变压器可以隔离网侧 零序分量,因此只有正序和负序分量可以传递到换 流器交流侧。当电网处于正常对称运行状态时,换 流器交流侧三相交流电压和电流只有正序分量;当 电网处于不对称运行状态时,换流器交流侧三相交 流电压和电流将含有正序和负序分量。图2中换流 器的正序内环电流控制用式(6)和式(7)表示,负序 内环电流控制用式(8)和式(9)表示^[20]。

$$v_{d}^{+} = u_{d}^{+} - \omega L i_{q}^{+} + (k_{p} + k_{i}/s)(i_{d}^{+*} - i_{d}^{+})$$
(6)

$$v_{a}^{+} = u_{a}^{+} + \omega L i_{d}^{+} + (k_{p} + k_{i}/s)(i_{a}^{+*} - i_{a}^{+})$$
(7)

$$v_{d}^{-} = u_{d}^{-} + \omega L i_{q}^{-} + (k_{p} + k_{i}/s)(i_{d}^{-*} - i_{d}^{-})$$
(8)

$$v_{q}^{-} = u_{q}^{-} \omega L i_{d}^{-} + (k_{p} + k_{i}/s)(i_{q}^{-*} - i_{q}^{-})$$
(9)

式中:k_p和k_i分别为内环电流控制的比例系数和积 分系数;i^{**}_a、i^{**}分别为换流器输出正序交流电流的d、 q轴分量的指令值,其取值由换流器外环正序电压控 制给出;i^{**}_a、i^{**}分别为换流器输出负序交流电流的d、 q轴分量的指令值,采用抑制负序电流策略时,其取 值均为0,采用负序电压控制策略时,其取值由换流 器外环负序电压控制给出。

1.3 外环电压控制

图 2 中换流器的正序外环电压控制用式(10)和式(11)表示,负序外环电压控制用式(12)和式(13) 表示^[20]。

$$i_{d}^{**} = i_{\mathrm{L}d}^{*} - \omega C u_{q}^{*} + (k_{\mathrm{p2}} + k_{\mathrm{i2}}/s)(u_{d}^{**} - u_{d}^{*})$$
(10)

$$i_{q}^{**} = i_{Lq}^{*} + \omega C u_{d}^{*} + (k_{p2} + k_{i2}/s)(u_{q}^{**} - u_{q}^{*})$$
(11)

$$i_{d}^{-*} = i_{Ld}^{-} - \omega C u_{q}^{-} + (k_{p2} + k_{i2}/s)(u_{d}^{-*} - u_{d}^{-})$$
(12)

$$i_{a}^{-*} = i_{1a} + \omega C u_{d}^{-} + (k_{p2} + k_{i2}/s)(u_{a}^{-*} - u_{a}^{-})$$
(13)

式中: u_d^{**} 、 u_q^{**} 分别为PCC处正序交流电压的d、q轴分量的指令值: u_d^{-*} 、 u_q^{-*} 分别为PCC处负序交流电压的d、q轴分量的指令值: i_{1d}^{*} 、 i_{1q}^{*} 分别为并联电容器网侧输出交流电流 i_{1abc} 的正序d、q轴分量: i_{1d} 、 i_{1q}^{*} 分别为并联电容器网侧输出交流电流 i_{1abc} 的负序d、q轴分量: k_{p2} 和 k_{p2} 分别为外环电压控制的比例系数和积分系数。因为低压构网型换流器的传统外环电压控制 是基于并联滤波器等值电容的电气关系构建的,所 以式(10)—(13)中包含并联滤波器的等值电容C。

2 电压电流比例控制

2.1 高压构网型换流器系统

图3为向无源网络供电的高压构网型换流器的 系统结构图。图中,L'、R'分别为换流器和变压器的 总等值电感和总等值电阻。高压构网型换流器为达 到较高的输出电压等级,一般使用模块化多电平换 流器,输出电平数增多降低了换流器输出电压的谐 波含量,可取消系统中并联的滤波电容;另一方面, 高压系统并联的滤波电容成本显著高于低压系统并 联的滤波电容,为提升经济性一般也不在高压系统 中安装滤波电容。



图 3 高压构网型换流器系统拓扑 Fig.3 Topology of high-voltage grid-forming

converter system

根据式(10)一(13),低压构网型换流器的传统 外环电压控制需要基于并联电容构建,无法用于高 压构网型换流器。因此,高压构网型换流器控制在 保留内环电流控制时,需构建不依赖于并联电容的 新型外环电压控制,通过改变内环电流控制的电流 指令值来控制高压构网型换流器的网侧交流电压。

2.2 新型外环电压控制

结合正序内环电流控制,此处提出基于换流器 电压和电流比例耦合关系的电压电流比例控制作为 高压构网型换流器的外环电压控制。式(14)和式 (15)是基于电压电流比例控制的换流器正序外环电 压控制,其输出作为正序内环电流控制的指令值。

$$i_d^{**} = i_d^* + (u_d^{**} - u_d^*)/z \tag{14}$$

$$i_{*}^{**} = i_{*}^{*} + (u_{*}^{**} - u_{*}^{*})/z$$
(15)

式中:z为比例常数。类似地,可构建式(16)和式 (17)所示的换流器负序外环电压控制。

$$i_d^{-*} = i_d^{-} + (u_d^{-*} - u_d^{-})/z$$
(16)

$$\dot{i}_{q}^{-*} = \dot{i}_{q} + (u_{q}^{-*} - u_{q}^{-})/z \tag{17}$$

在电压电流比例控制下,换流器输出正负序交流电流的 dq 轴分量相对其指令值的偏差分别与换流器输出正负序交流电压的 dq 轴分量相对其指令 值的偏差构成比例关系。结合式(6)、(7)、(14)、 (15)可得:

$$u_{d}^{+} = \frac{sk_{p} + k_{i}}{s(k_{p} - z) + k_{i}} u_{d}^{+*} - zs \frac{v_{d}^{+} + \omega Li_{q}^{+}}{s(k_{p} - z) + k_{i}}$$
(18)

$$u_{q}^{*} = \frac{sk_{p} + k_{i}}{s(k_{p} - z) + k_{i}} u_{q}^{**} - zs \frac{v_{q}^{*} - \omega Li_{d}^{*}}{s(k_{p} - z) + k_{i}}$$
(19)

$$u_{d}^{+} = u_{d}^{+*} - \frac{sL + R}{sk_{p} + k_{i}} zsi_{d}^{+}$$
(20)

$$u_{q}^{+} = u_{q}^{+*} - \frac{sL + R}{sk_{n} + k_{i}} zsi_{q}^{+}$$
(21)

将电压电流比例控制作为新型外环电压控制, 替换传统外环电压控制。从式(14)—(17)可知,新 型外环电压控制的构建不依赖于并联电容,适用于 无并联电容的高压构网型换流器。在稳态时,根据 式(20)、(21)可知正序交流电压的dq轴分量在电压 电流比例控制作用下将跟踪其指令值。注意比例常 数z是电压电流比例控制的唯一控制参数,在标幺 值系统下,z一般可在(0.5,2)的范围内选取,使电压 电流比例关系处在同一数量级,充分发挥控制效果。

为了消除耦合关系,也可以专门在外环电压控 制中引入前馈项将干扰项抵消。本文为了简化分 析,不再考虑前馈解耦。

2.3 整体控制架构

根据图2所示构网型换流器的整体控制框图, 交流分量*dq*轴变换的同步相位为:

$$\theta = \int \boldsymbol{\omega}^* \mathrm{d}t + \theta_0 \tag{22}$$

式中:θ₀为初相位;ω^{*}为换流器交流电压角频率的指 令值,其常见取值方法如下。

1)采用恒电压运行时,交流电压角频率指令值 等于电网角频率额定值,如式(23)所示。

$$\omega^* = \omega$$
 (23)

2)采用同步机模拟运行时,交流电压角频率指 令值由式(24)确定^[16]。

$$\omega^* = \omega + \frac{1 + sT_2}{D(1 + sT_1)} \left(P^* - P \right)$$
(24)

式中:P^{*}和P分别为换流器输出有功功率的指令值 和实际值;D为有功功率偏差和角频率偏差之间的 比例系数;T₁和T₂为2个时间常数。式(24)模拟了 同步电机的惯性特征,以及一次调频中频率偏差和 有功功率偏差之间的比例关系。

通过改变初相位 θ_0 ,可令d轴与换流器输出a相 电压相位一致,换流器输出正序电压的 d_q 轴分量 的指令值分别为:

$$u_d^{**} = U^*$$
 (25)

$$q_{q}^{+*} = 0$$
 (26)

式中:U^{*}为换流器PCC处交流电压幅值的指令值。 分别对式(6)—(9)进行 dq坐标逆变换,可得换流器 输出正序和负序三相交流电压调制波,叠加两者可 得到换流器输出三相交流电压调制波。

u

在正常稳态时,换流器输出交流电流将跟踪其 指令值,换流器的交流电压和电流都在其限额内。 正序内环电流控制具有快速的电流调节能力,通过 对其输入的正序电流指令值进行限幅,可以实现故 障限流,避免换流器过流闭锁和损坏^[4]。换流器的 负序外环电压控制也可对换流器输出的负序交流电 压进行抑制;考虑到防止换流器过流闭锁和损坏,本 文中负序分量控制主要使用抑制负序电流策略,将 负序内环电流控制中负序电流 dq 轴分量的指令值 均设为0,不再加入负序外环电压控制。

3 仿真测试

根据图3所示高压构网型换流器系统拓扑,建 立向无源网络供电的高压构网型换流器的仿真系统,高压构网型换流器采用模块化多电平换流器,交 流侧无并联容性滤波器,系统参数如附录A表A1所示。控制框图如图2所示,控制参数如附录A表A2 所示。对正序分量,使用电压电流比例控制对正序 dq轴电压进行控制,使用内环电流控制对正序dq轴 电流进行控制。对负序分量,使用内环电流控制对 负序dq轴电流进行抑制,负序dq轴电流指令值均取 0。对侧换流器采用文献[5]所提定直流电压控制, 以对本侧构网型换流器提供稳定的直流侧电压。模 块化多电平换流器采用最近电平逼近调制和排序型 电容电压平衡控制^[5],不再配置环流抑制控制。

3.1 负荷阶跃下同步机模拟运行算例

200

在电网正常运行状态下,构网型换流器处于正 常交流电压控制状态。外环电压控制根据PCC处交 流电压指令,给出内环电流控制的电流指令;再由内 环电流控制确定换流器输出交流电压指令,最终实 现控制PCC处交流电压的目标。

本算例用于测试同步机模拟运行的构网型换流器在交流电网负荷正常阶跃时的系统响应。在 3.5 s时,交流电网切除5.5 MW负荷,测试在扰动下 的系统响应。为了消除稳态频率偏差,在4 s时,投 入文献[15]中的同步机模拟运行二次调频功能,通 过频率负反馈的积分环节对换流器有功功率指令值 进行调节,使扰动后的电网频率逐渐恢复到额定值。 图4为负荷阶跃下换流器同步机模拟运行的各电气 量仿真波形。图中:Q为换流器输出的无功功率;f 为换流器频率指令值。除频率外,图中变量均为标 幺值,后同。

由图4可知:在交流电网22%的负荷被切除后, 换流器输出的有功功率和正序d轴电流出现对应比 例的降低,在式(24)的惯性特征和一次调频比例关 系下,换流器频率逐渐升高至50.04 Hz;正负序dq轴 电压也出现一定程度的短时轻微扰动,相应扰动在 0.1 s内基本消除;在4 s时,同步机模拟运行的二次 调频功能投入后,换流器频率将缓慢恢复到额定频 率,由于二次调频响应较慢,频率恢复过程时间较 长,该特性与传统发电机的二次调频特性类似。综 上,在电网正常运行及扰动时,高压构网型换流器在 电压电流比例控制作用下,其PCC处交流电压和换 流器交流电流均能够跟踪其对应的指令值,实现构 网型换流器控制目标。

3.2 单相接地故障下恒电压运行算例

在电网突发故障时,换流器正常交流电压控制 的目标已无法实现,此时正序外环电压控制给出的 正序电流指令值将被限幅,外环电压控制失效,正序 内环电流控制自动进入故障限流状态,防止换流器 过流闭锁和损坏。抑制负序电流策略可以抑制电网 不对称故障下的负序电流,但是换流器有功和无功





功率会出现2倍工频的振荡分量,相关内容在文献 [4-5]中已有详细论述。

本算例用于测试恒电压运行的构网型换流器在 交流电网单相接地短路故障时的系统响应,换流器 交流电压角频率的指令值取电网额定角频率。在 1.1 s时,交流电网a相发生接地短路故障,故障持续 0.2 s后清除。图5为单相接地故障下换流器恒电压 运行的各电气量仿真波形。

由图5可知:故障期间,a相电压跌落至接近0, 三相交流电压严重不平衡;负序内环电流控制可以 抑制负序电流,三相交流电流仍然维持平衡;由于电 网电压严重跌落,正序内环电流控制中的d轴电流 控制的指令值被限幅环节限制,避免换流器进入过 流闭锁,这也导致正序外环电压控制中的d轴电压 无法维持在其指令值;由于负序电压的存在,换流器 有功和无功功率在故障期间出现2倍工频的波动特 征;故障清除后,换流器电压电流等逐渐恢复至正常





Fig.5 Simulative waveforms of converter under constant voltage operation during single-phase grounding fault

运行状态。综上,在电网故障时,恒电压运行的构网 型换流器在电压电流比例控制作用下,可以自动快 速进入正序电流限幅和负序电流抑制状态,避免换 流器过流闭锁以及损坏,并在电网故障清除后自动 恢复至正常运行。

3.3 单相接地故障下同步机模拟运行算例

本算例用于测试同步机模拟运行的构网型换流器在交流电网单相接地短路故障时的系统响应,换流器交流电压角频率的指令值由式(24)确定。在1.1 s时,交流电网a相发生接地短路故障,故障持续0.2 s后清除。图6为单相接地故障下换流器同步机模拟运行的各电气量仿真波形。由图可知:在电网故障时,同步机模拟运行的构网型换流器在电压电流比例控制作用下,同样可以自动快速进入正序电流限幅和负序电流抑制状态,避免换流器过流闭锁以及损坏,并在电网故障清除后自动恢复至正常运行。

类似地,在电网发生三相对称接地故障时,高压 构网型换流器在电压电流比例控制作用下,也可以 自动快速进入正序电流限幅,避免换流器过流闭锁



图6 单相接地故障下换流器同步机模拟运行仿真波形 Fig.6 Simulative waveforms of converter under synchronous generator emulation operation during single-phase grounding fault

以及损坏,并在电网故障清除后自动恢复至正常运行。

4 结论

1)本文引入电压电流比例关系构建换流器的无 电容矢量电压控制,与内环电流控制构成高压构网 型换流器级联控制架构。电压电流比例外环控制不 依赖于换流器交流侧并联容性滤波器,适合用于输 出波形质量高的高压大容量多电平换流器,取消交 流侧并联的滤波电容。

2)在电网正常运行及扰动时,构网型换流器在 电压电流比例控制作用下,其PCC处交流电压和换 流器交流电流均能够跟踪其对应的指令值,实现构 网型换流器控制目标。

3)在电网故障时,构网型换流器在内外环级联控制作用下,可以自动快速进入正序电流限幅和负序电流抑制状态,避免换流器过流闭锁以及损坏,并 在电网故障清除后自动恢复至正常运行。

4)电压电流比例外环控制可以与恒电压运行或 同步机模拟运行相结合,实现电网不对称故障下构 网型换流器的正序电流限幅和负序电流抑制。另 外,电压电流比例外环控制与同步机模拟运行结合, 可以使构网型换流器模拟同步电机的惯性特征,以 及一次调频和二次调频功能。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

202

- [1]杨健,宋鹏程,徐政,等.特高压直流接入背景下的UPFC系统 级控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(10):109-117.
 YANG Jian, SONG Pengcheng, XU Zheng, et al. System-level control strategy for UPFC power grids integrated with UHVDC
 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 109-117.
- [2] 刘颖明,王维,王晓东,等.结合风功率预测及储能能量状态的 模糊控制策略平滑风电出力[J].电网技术,2019,43(7):2535-2543.

LIU Yingming, WANG Wei, WANG Xiaodong, et al. A fuzzy control strategy combined with wind power prediction and energy storage SOE for smoothing wind power output[J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2535-2543.

- [3] 孙玉树,杨敏,师长立,等.储能的应用现状和发展趋势分析
 [J].高电压技术,2020,46(1):80-89.
 SUN Yushu,YANG Min,SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J].
 High Voltage Engineering,2020,46(1):80-89.
- [4] YAZDANI A, IRAVANI R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(3):1620-1629.
- [5] GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12):4858-4867.
- [6] LU Shaoqi, XU Zheng, XIAO Liang, et al. Evaluation and enhancement of control strategies for VSC stations under weak grid strengths[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018,33(2):1836-1847.
- [7] 胡彬,吴超,年珩,等. 薄弱电网下新能源设备并网锁相同步方 式综述[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):26-34,41.
 HU Bin, WU Chao, NIAN Heng, et al. Overview of phaselocked synchronization methods of renewable energy equipment in weak and distorted grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):26-34,41.
- [8] 许烽,宣晓华,陆翌,等.向无源网络供电的LCC-MMC混合直 流输电系统控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(15): 129-135.

XU Feng, XUAN Xiaohua, LU Yi, et al. Control strategies for LCC-MMC hybrid DC system connected to passive networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (15) : 129-135.

- [9] ACKERMANN T, PREVOST T, VITTAL V, et al. Paving the way:a future without inertia is closer than you think[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(6):61-69.
- [10] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2):61-73.
- [11] 黄鑫,汪可友,李国杰,等.含多并联组网DG的微电网分层控制体系及其控制策略[J].中国电机工程学报,2019,39(13): 3766-3776.

HUANG Xin, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Hierarchical architecture and control strategy for micro-grid with multi-parallel grid-forming DGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (13):3766-3776.

- [12] 徐政.高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J].南方电网技术,2020,14(2):1-9.
 XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources[J]. Southern Power System Technology,2020,14(2):1-9.
 [13] 管敏渊,徐政.向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模
- [15] 官報渊, 徐政, 问无源网络供电的 MMC 型直流轴电系统建模 与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2):255-263. GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2):255-263.
- [14] SCHÖNLEBER K, PRIETO-ARAUJO E, RATÉS-PALAU S, et al. Extended current limitation for unbalanced faults in MMC-HVDC-connected wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1875-1884.
- [15] GUAN M Y, PAN W L, ZHANG J, et al. Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter (VSC) stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015,30(6):3093-3101.
- [16] 管敏渊,王锋华,成敬周,等. 换流器同步机模拟控制中的小干 扰稳定策略[J]. 高电压技术,2019,45(1):252-258.
 GUAN Minyuan,WANG Fenghua,CHENG Jingzhou, et al. Smallsignal stability enhancement scheme for the synchronous generator emulation control of voltage source converter[J]. High Voltage Engineering,2019,45(1):252-258.
- [17] 熊明,靳斌,李兴,等. 模块化多电平换流器交流侧快速自励充 电策略[J]. 电网技术,2016,40(9):2789-2794.
 XIONG Ming,JIN Bin,LI Xing, et al. Fast self charging strategy in AC side of modular multilevel converter[J]. Power System Technology,2016,40(9):2789-2794.
- [18] 王小强,罗海云,涂小刚,等. 基于 VME 总线的柔性直流输 电系统阀控系统设计[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1): 104-110.
 WANG Xiaoqiang,LUO Haiyun,TU Xiaogang,et al. Valve control system based on VME bus of flexible HVDC system[J].
- Power System Protection and Control, 2017, 45(1):104-110.
 [19] FREYTES J, LI J Q, DE PRÉVILLE G, et al. Grid-forming control with current limitation for MMC under unbalanced fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3):1914-1916.
- [20] SCHÖNLEBER K, PRIETO-ARAUJO E, RATÉS-PALAU S, et al. Handling of unbalanced faults in HVDC-connected wind power plants[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152: 148-159.

作者简介:



管敏湖(1985—),男,高级工程师,博士, 通信作者,主要研究方向为模块化多电平换 流器、柔性交直流输电技术、新能源并网和储 能技术(E-mail:guanminyuan@gmail.com);

沈建良(1971—),男,高级工程师,主 要研究方向为电气工程及其自动化(E-mail: 1738596130@qq.com);

管敏渊

楼 平(1967—),男,教授级高级工程 师,主要研究方向为电气工程及其自动化

 $(E-mail:louping2005@126.com)_{\circ}$

(编辑 王欣竹)

Voltage and current proportional control for AC capacitor-less grid-forming converter with fault current limitation

GUAN Minyuan, SHEN Jianliang, LOU Ping, LAI Jun, LI Fan, WANG Jianfeng

(Huzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Huzhou 313000, China)

Abstract: By introducing the voltage and current proportional relationship, a capacitor-less vector voltage control is proposed for the high-voltage grid-forming converter. A cascaded control architecture is composed of the proposed outer-loop voltage control and conventional inner-loop current control. The positive-current limitation and negative-sequence current suppression capabilities are retained to prevent the converter from over-current blocking and damage during grid faults. Unlike the conventional outer-loop voltage control, the proposed voltage-current proportional control is developed irrespective of the AC-side shunt filter capacitor, which is suitable for outer-loop voltage control of the high-voltage grid-forming converter. By selecting the specific AC voltage frequency reference, the grid-forming converter can realize either constant voltage operation or virtual synchronous generator (VSG) operation. The time-domain simulative results show that the negative-sequence current suppression and fault ride-through capabilities are automatically realized by the proposed converter control during grid faults. Moreover, the grid-forming converter is prevented from over-current blocking and damage, and can be restored to the normal operation condition when the grid fault is cleared.

Key words: capacitor-less vector voltage control; grid-following; grid-forming; electric converters; voltage and current proportional control; virtual synchronous generator; fault ride-through; unbalanced

(上接第174页 continued from page 174)

Multi-time granularity robust evaluation method for flexible load aggregation flexibility

WANG Guangrui^{1,2}, LI Zhengshuo^{1,2}, LIU Congcong^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,

Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: For flexible load virtual power plant(FLVPP), the robust evaluation method of dynamic aggregation flexibility containing intra-day rolling time window, dispatching cycle, and minute-level multi-time granularity is proposed. The necessity of multi-time granularity evaluation is analyzed. The robust evaluation model for maximizing multi-time period aggregation flexibility is constructed, which takes into account the effects of multi-time period coupling, power network congestion, variation of load operating state during the dispatching period, and time-delay response. This model is a decision-dependent uncertainty optimization model, which can be transformed into a conventional two-stage robust optimization problem using mathematical transformation, and an iterative solution strategy based on nested column-and-constraint generation algorithm is designed for the problem of binary variables existing in the second-stage. Case study analysis verifies that the proposed method can evaluate the aggregation flexibility of FLVPP more accurately than the existing methods. Meanwhile, the necessity of considering the power network constraint in evaluating the aggregation flexibility is verified, and the computational performance of the algorithm is demonstrated.

Key words: flexible load; virtual power plants; robust optimization; multi-time granularity; decision-dependent uncertainty; nested column-and-constraint generation algorithm

附录 A

表 A1 仿真系统参数

 Table A1
 Parameters of simulation system

	参数		数值	参数	数值
	电网额定频率	率/Hz	50	桥臂电抗/H	0.053
月	电网额定交流时	电压/kV	35	子模块电容/μF	4 650
换济	〔器额定容量/	(MVA)	20	换流变额定容量/(MV A)	30
÷	换流器最大过	流倍数	1.5	换流变压器变比	36/31
换	流器额定直流	电压/kV	± 30	换流变压器漏抗/p.u.	0.08
换	流器额定交流	电压/kV	31	有功负荷/MW	25
	桥臂子模块药	数/个	49	无功负荷/Mvar	2.5
-					

表 A2 控制系统参数						
Table A2Parameters of control system						
参数	数值					
内环电流控制比例系数和积分系数 $m{k}_{ m p1}$, $m{k}_{ m i1}$ /p.u.	1.6, 33.3					
外环电压控制比例系数 z/p.u.						
正序 d 轴和 q 轴电压指令值 i_d^{**} , i_q^{**} /p.u.	1, 0					
正序 d 轴电流指令值限幅/p.u.	-1.4 ~ +1.4					
正序 q 轴电流指令值限幅/p.u.	$-0.5 \sim +0.5$					
负序 d 轴和 q 轴电压指令值 i_d^{-*} , i_q^{-*} /p.u.	0, 0					
同步机模拟运行比例系数 D/(MW s rad)	10					
同步机模拟运行时间常数 T1, T2/s	0.5, 0.05					
同步机模拟运行频率限幅/Hz	49.5 ~ 50.5					
同步机模拟运行有功功率指令值 P*/MW	25					