

面向快频控制的构网变流器非线性模型 预测控制

刘震^{1,2}, 朱子民^{1,2}, 王小云^{1,2}, 南东亮^{1,2}, 段玉^{1,2}, 吴小芳^{1,2}

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:随着电力系统中可再生能源渗透率提高,基于变流器实现并网的设备将在电网中逐渐占据主导地位。在系统频率稳定性支撑方面,能同时提供主动惯量支撑和快速频率响应服务的构网型变流器具有巨大应用潜力。但在构网型变流器产生大量有功功率需求后,由于直流侧电源设备的功率受到限制,直流电压可能出现崩溃的现象。为此提出了一种可维持直流电压稳定的非线性模型预测控制,避免构网型变流器向电网提供频率支持时直流侧发生故障。该控制通过感知变流器相邻母线的频率,跟踪预定义的直流电压设定值来确定对有功功率支持的要求,确保在突发事件后给出可量化的频率支持。非线性模型预测控制的设计结合了构网型变流器的限流和输入控制约束,使其能够在事故发生后的短时间内提供最大输出功率,同时避免直流电压崩溃。利用 Matlab/Simulink 对 Kundur 2 区 4 机系统和 IEEE 16 机 68 线系统以高精度相量模型为基础进行了仿真验证,结果表明所提方法能有效抑制直流电压崩溃,为快速频率调整提供功率支撑。

关键词: 构网型变流器;下垂控制;非线性模型预测控制;快速频率响应;滑模控制

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd26153

Nonlinear Model Predictive Control of Grid-forming Converters for Fast Frequency Control

LIU Zhen^{1,2}, ZHU Zimin^{1,2}, WANG Xiaoyun^{1,2}, NAN Dongliang^{1,2}, DUAN Yu^{1,2}, WU Xiaofang^{1,2}

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Whole Process Simulation of Xinjiang Power System, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: As the penetration of renewable energy in power systems increases, converter-based devices are gradually becoming dominant in the grid. In terms of system frequency stability support, grid-forming converters, which can provide both active inertia support and fast frequency response services, hold great potential for application. However, due to power limitations on the DC side equipment, when there is a high demand for active power from the grid-forming converter, the DC voltage may collapse. To address this, a nonlinear model predictive control (NMPC) method was proposed to maintain DC voltage stability, prevent faults on the DC side when the grid-forming converter provides frequency support to the grid. This control method senses the frequency of the bus adjacent to the converter and tracks a predefined DC link voltage setpoint to determine the required level of active power support, and ensures quantifiable frequency support following an emergency. The design of the nonlinear MPC incorporates the current limiting and input control constraints of the grid-forming converter, enabling it to deliver maximum output power in a short period following an incident, while also avoiding DC voltage collapse. Simulations based on high-precision phasor models of Kundur 2-area 4-machine system and the IEEE 16-machine 68-node system were conducted using Matlab/Simulink. The results show that the proposed method can effectively suppress the DC voltage collapse and provide power support for fast frequency adjustment.

Key words: grid-forming converter (GFC); droop control; nonlinear model predictive control (NMPC); fast frequency response (FFR); sliding mode control

基金项目: 国网公司省级科技项目(B330DK240009);自治区重大科技专项(2022A01004)

作者简介: 刘震(1993—),男,本科,工程师,主要研究方向为电力系统运行、电力系统安全稳定分析,Email: 734402468@qq.com

在“双碳”目标的推动下,电力系统的供电结构正在从以化石能源为主的传统模式向以清洁能源为核心的可再生能源模式快速转变。随着同步发电机占比逐渐减小,电网的惯量水平显著降低,导致在应对断电或负荷剧烈波动等突发事件时,频率变化率大幅提高,且会更频繁地引发切机或低频减载等严重问题,威胁到系统频率稳定性^[1-3]。

在电力系统向弱电网转化的趋势下,构网型变流器(grid-forming converter, GFC)凭借其自主构建电压和主动支撑电网的特性,在低短路比场景中展现出显著的优势,能够有效维持电压和频率的稳定性。然而,现有研究表明,作为 GFC 主流控制策略的下垂控制存在明显局限性,其调节动态直接受到下垂系数的影响,不恰当的系数设置容易导致直流侧电压偏差和功率越限等问题,对系统稳定性造成不良影响。

下垂型 GFC 通过调整直流侧电压快速追踪交流侧有功指令,能够实现高效控制,但在应对较大功率扰动时直流电压表现出不稳定性。文献[4-6]以多种场景实验对比分析的形式发现了该类系统失稳问题。文献[7-9]在此现象的基础上,进一步分析了下垂系数对系统动态响应的影响机理,揭示出不合理的参数选择导致功率输出受限和直流电压崩溃的风险。文献[10]重点讨论了频率稳定性与直流电压稳定性的关联,并以实验的形式展示了在过大频率扰动下下垂型 GFC 直流侧出现的电压不稳定问题。在此基础上,文献[11]进一步分析出直流电压稳定问题的原因在于交流侧功率需求过大,并提出对交流电流进行限制的解决方案。

为解决下垂型 GFC 的稳定问题,从电气量限制、算法优化和功率补偿等多角度给出了解决方案。然而,现有方案下大多在场景和设备层面设置理想假设,难以在实际的下垂型 GFC 运行场景中给出良好的解决效果。文献[12]提出了一种用于保证 GFC 全局稳定性的混合角度控制,然而该方法限制了 GFC 的备用功率,无法实质上解决下垂控制下 GFC 直流侧电压崩溃问题。文献[13]尝试通过无功补偿来抑制过电压的方法,但这种方法需要额外加入无功补偿设备,成本较高。文献[14]提出了一种基于多变量的 GFC 控制的最优控制策略,该策略假设去除直流侧电流限制以实现 GFC 直流侧电压稳定,但该设置仅在理想情况下

可实现,普适性较差。文献[15-16]中的滑模控制在 GFC 直流侧和交流侧准确设置了电流限制,保证了下垂型 GFC 直流侧电压稳定性,然而这种控制在时序上的设计并不适用于多个 GFC 互联的场景,在场站级的应用上存在缺陷。

针对上述问题,本文提出一种可面向场站级 GFC 快速频率响应(FFR)的非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)方案,以解决构网型变流器在频率受较大扰动场景下的功率响应和电压稳定问题。首先,提供一种 GFC 电路模型及对应控制模型,对其拆解分析;其次,基于 GFC 模型及限幅模型,探究了直流电压崩溃的机理,通过典型案例佐证并深化了该理论;然后,提出一种基于 NMPC 的控制策略,综合考虑直流侧和交流侧限流约束,通过优化控制输入,在给定采样间隔内实现场站级 GFC 快速频率支撑的最优功率输出;最后,基于 Kundur 2 区 4 机系统和 IEEE 16 机 68 线系统,利用 Matlab/Simulink 对所提出的控制方案进行仿真测试,验证所提方案的技术可行性。

1 构网变流器并网模型

本节提供了 GFC 并网系统的相量模型建模方式,该模型包含了同步发电机、变流器和负载,可用于验证 GFC 的性能。模型包含网架侧模型和 GFC 模型两部分。

1.1 网架侧模型

在网架侧建立了带调速器的六阶同步发电机模型^[17]。负载和网络采用代数方程建模。总线电压 V_{bus} 采用公式 $I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$ 求解,其中, Y_{bus} 为网络导纳矩阵, I_{bus} 为注入网络的电流的矢量。

1.2 构网变流器模型

1.2.1 电路模型

GFC 模型包含电路部分和用于控制变流器动作的控制部分^[18-19]。电路部分由代表储能或可再生能源的可控电流源、变流器和 LC 滤波器组成,电路结构如图 1 所示。图 1 中, R_f , L_f 和 C_f 为滤波阻抗; C_{dc} 为 GFC 的直流母线电容; G_{dc} 为用于等效直流侧损耗的电导。直流侧的最大有功功率决定了最大电流限制 i_{dc}^{max} 。

图 1 所示的 GFC 模型建立在以角频率 ω_c 为基准的同步 $d-q$ 参考系中,如下式所示:

$$i_{dc}^* = k_c (v_{dc}^* - v_{dc}) + i_m^* \quad (1)$$

$$\dot{i}_\tau = \frac{1}{\tau_c} (i_{\text{dc}}^* - i_\tau) \quad (2)$$

$$v_{\text{dc}} = \frac{1}{C_{\text{dc}}} \left[i_{\text{dc}}^{\text{max}} \text{sat}\left(\frac{\dot{i}_{\tau}}{i_{\text{dc}}^{\text{max}}}\right) - i_{\text{x}} - G_{\text{dc}} v_{\text{dc}} \right] \quad (3)$$

$$i_{ldq}^* = \begin{cases} i_{ac}^{\max} e^{j\angle i_{ldq}^*} & |i_{ldq}^*| \geq i_{ac}^{\max} \\ i_{ldq}^* & |i_{ldq}^*| < i_{ac}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{td} \\ \dot{i}_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & \omega_c \\ -\omega_c & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{td} \\ i_{tq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{td} - v_d \\ v_{tq} - v_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_{ld} = \frac{m_{ld} v_{dc}}{2} \\ v_{lq} = \frac{m_{lq} v_{dc}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_c = \frac{3}{2} \text{Re}(v_{dq} \bar{i}_{dq}) \\ P_d = \frac{3}{2} \text{Re}(v_{dq} \bar{i}_{dq}) = v_{dc} i_x \end{cases} \quad (7)$$

式中: L, C, R 为交流侧线路电感、电容和电阻; v_{dc} , i_{dc} 为直流电压、电流; ω_c 为变流器角频率; k_c 为直流侧电流参考的下垂系数; i_{τ} 为滤波电流; P_c, P_d 分别为在滤波后和变流前的 GFC 有功功率输出; τ_c 为直流侧电流源的延迟时间常数; i_x 为直流环节馈入变流器的电流; m_{dq}, m_{iq} 为 $d-q$ 参考系中变流器的调制指数; i_{dq}, v_{dq} 为 $d-q$ 参考系中的电流和电压; $i_{id, dq}, v_{id, dq}$ 为 $d-q$ 参考系下经滤波后的电流和电压; Re 代表取复数的实部; 上标 “*” 表示变量的参考值; 上标 “-” 表示变量的共轭值。

式(3)中的饱和函数 sat 表示直流侧电流的限幅控制,如下式所示:

$$\text{sat}(y) = \begin{cases} y & |y| \leq 1 \\ \text{sign}(y) & |y| > 1 \end{cases} \quad (8)$$

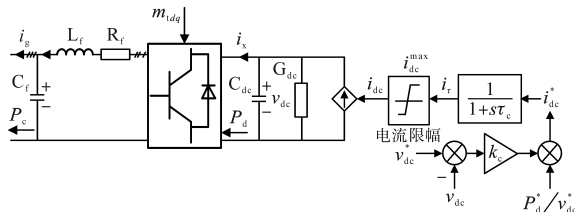


图1 构网变流器电路模型

Fig.1 Circuit model of grid-forming converter

1.2.2 控制模型

下垂型 GFC 的端电压幅值和频率控制如图 2 所示^[20-21]。

如图2所示,NMPC控制器提供了一个附加输入 u 以稳定直流链路电压。在该模型中, d 轴电压参考值 v_d^* 通过PI控制器用于交流电压幅度

控制, q 轴电压参考值 v_q^* 设为 0, d, q 轴电压参考和角度 θ_c 均供内部电压和电流控制环使用。变频器的调制指数 $m_{ud,q}$ 由电压和电流控制器产生, 如图 3 所示。

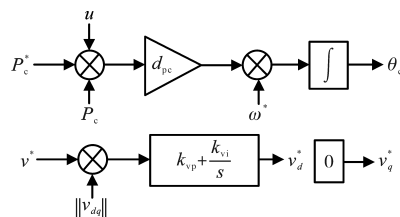


图2 GFC下垂控制模型

Fig.2 Control model of droop-controlled grid-forming converter

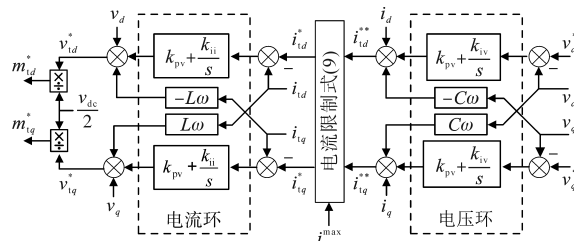


图3 构网变流器交流侧电流和电压控制

Fig.3 AC- current and voltage control of grid-forming converter

内部电流控制包括一个电流限制模块,用于在故障事件期间保护电力电子元件免受大电流的影响。当电流幅值达到最大限值时,交流电流控制将保持 d 轴和 q 轴分量之间的相位角,该控制可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} i_{vdq}^* &= \begin{cases} i_{ac}^{\max} e^{j\angle i_{vdq}^*} & |i_{vdq}^*| \geq i_{ac}^{\max} \\ i_{vdq}^* & |i_{vdq}^*| < i_{ac}^{\max} \end{cases} \\ x_{vq} &= -k_{pv} \left[-\omega_e v_d + \frac{1}{C} (i_{lq} - i_q) \right] - k_{iv} v_q \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$x_{vq} = -k_{pv}[-\omega_c v_d + \frac{1}{C}(i_{tq} - i_q)] - k_{iv}v_q$$

2 构网变流器自建压过程功率-电压机理分析

本节分析了构网变流器在自建压过程中功率—电压的关系曲线,解析了在扰动下垂型构网设备自建压失败机理,以第1节所建立GFC模型验证理论并形成结论。

2.1 构网变流器功率—电压关系分析

GFC 外特性表现为电压源,通过主动构建电压对电网提供支撑,由式(3)和式(7)可推导 GFC 稳态功率和直流电压关系,如图 4 所示。稳定点标记为 $(v_{dc}^{(1)}, \bar{P}_d)$,此时 GFC 处于非最大功率点 $\bar{P}_d$ 。在任何突发事件发生后,GFC 都可以向电网输出值为 $P_d^{\max} - \bar{P}_d$ 的备用稳态有功功率,为电网提供频率支持。而当直流电流达到最大限制时,如果电压低于 $v_{dc}^{(2)}$,直流电压将会进入恶性循环,逐渐

下降,导致变流器退出运行,系统频率水平进一步恶化。

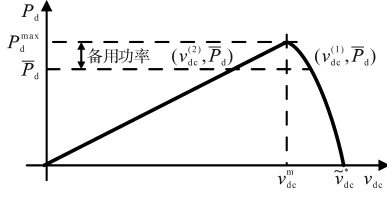


图4 下垂控制构网变流器中直流电压和功率特性

Fig.4 DC voltage and power characteristics of the droop-controlled grid-forming converter

2.2 构网变流器-电力系统等效模型

基于 GFC 自主构建电压的特性,可将 GFC 等效为受控电压源与等效阻抗的串联形态,如图 5 所示。图中, L_e , C_e 和 R_e 为 GFC 的等效阻抗; L_g 和 R_g 为网侧阻抗; U_t, θ_t 为 PCC 点电压幅值及相角, U_g 为电网电压幅值; U_e, θ_e 为等效电压源电压幅值及相角; i_g, i_c, i_L 分别为流入网侧电流、流入滤波电容 C_f 电流、流出 GFC 等效电压源的电流。根据基尔霍夫电压定律可得^[22]:

$$i_g = \frac{U_t e^{-j\theta_t} - U_g}{R_g + j\omega L_g} \quad (10)$$

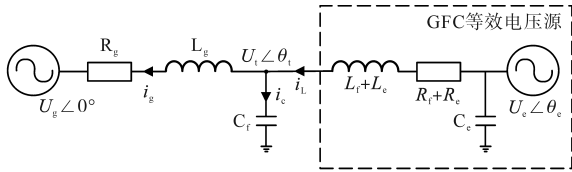


图5 下垂控制构网变流器的并网系统等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of the droop-controlled grid-forming converter

考虑低压故障,电网出现扰动的瞬间将导致 U_g 骤降,而 U_t 保持不变,此时 GFC 将开始爬坡并提升 i_L 的输出以支持网侧电压水平。与同步机的控制方式不同,GFC 向网侧输出的 i_L 需要设置电流限幅以保护电力电子元件。

2.3 电流限幅对 GFC 运行影响分析

GFC 在电网故障下 i_L 未达到幅值限制时,将正常模拟同步机动态构筑电网电压。下垂型 GFC 采用 d 轴有限电流限幅法,限幅法的表达式为^[11]

$$i_{Lref-S} = \begin{cases} i_{Lref} & i_{Lref} \leq i_{dref} \\ i_{dref} e^{-j0^\circ} & i_{Lref} > i_{dref} \end{cases} \quad (11)$$

其中, i_{dref} 为电流环 d 轴分量的参考值, q 轴分量为 0; i_{Lref} 为 i_L 的参考值,一定程度表征故障后网侧对 GFC 的功率需求。

从电流限幅策略可以看出,在 i_{Lref} 小于电流

限幅时,GFC 与同步机动态一致,而在 i_{Lref} 大于 i_{dref} 时,GFC 进入限幅模式,此时 d 轴电流分量饱和,直流侧可提供的功率达到极限。在故障未及时切除的前提下,功率平衡上仍呈现 $P_c < P_d$ 的状态,源侧、网侧功角 θ_e 及 θ_g 之间的差距逐渐拉大,此时变流器将抽取直流电容功率持续供能来满足有功指令修正有功不平衡。但由于电流环参考值被限制,电压环失效,GFC 外特性直接表现为一个等效电流源, $Q-V$ 下垂控制失效,无法继续自建压过程,导致图 4 中 v_{dc} 工作点快速向曲线左侧移动,直至发生电压崩溃现象,其本质上是变流器有功下垂系数设置与故障实际需求不匹配问题。

2.4 案例测试

在 IEEE 16 机 68 线系统中测试并记录了功率—电压不稳定性问题,系统中添加带有 GFC 的可再生能源及储能。设定在 $t=0.1$ s 时总线 7 上的负载阶跃增加,观测该事件对总线 1 上 GFC 的影响,如图 6 所示。

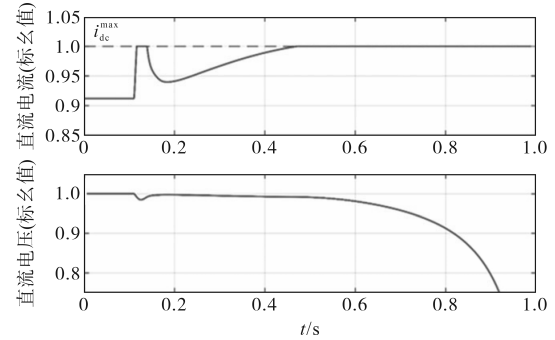


图6 负荷事件后 IEEE 测试系统中 GFC-1 的直流电流和电压

Fig.6 DC- current and voltage for GFC-1 of the IEEE test system after the load event

从图 6 可以看到,在扰动发生后,由于有功指令需求过快,直流电流在爬坡过程中超过限额并在 ms 级尺度进入限幅状态,直流电压在这一过程中短暂下降并被下垂控制拉回。此时 i_d 已经饱和,直流电流保持在最大值 i_{dc}^{max} ,但实际功率需求没有得到满足,为保证功率平衡,电容器放电以追踪有功指令。直流电流受到功率回冲影响而小幅度下跌,此时直流电压基本不变化。在直流电流被拉回到饱和水平,电容放电基本结束。直流电流第二次的饱和,直接导致 $Q-V$ 控制失效,直流电压和 GFC 的实际输出功率开始大幅下降,不断恶性循环,直致电压达到崩溃。

从该案例中可以得到结论:当受下垂系数影响的有功指令大于 i_{dc}^{max} 内可提供的功率量,下垂

控制就会导致GFC直流侧出现电压稳定性问题。为解决此问题,本研究将基于NMPC的控制算法,在现有的下垂控制中添加一个附加控制来修正电压崩溃现象,后面将详细介绍该控制的原理和功能。

3 非线性模型预测控制算法

本节提出了一种基于NMPC的控制策略,在控制系统设计中考虑了对不同变流器参数的约束。该控制可以起到稳定直流链路电压的作用,并在突发事件后持续提供频率支撑。

3.1 NMPC 控制结构

NMPC算法在构网变流器控制应用的整体流程图如图7所示。为了确保在突发事件后提供有效的快速频率支撑,GFC需要产生对应FFR需求的有功功率,综合电压和功率特性,NMPC将调节扰动后的直流电压至 v_{dc}^m 作为控制目标。为避免直流电压产生崩溃的情景,对目标函数加入对交流电流和受控输入 u 的约束输入。

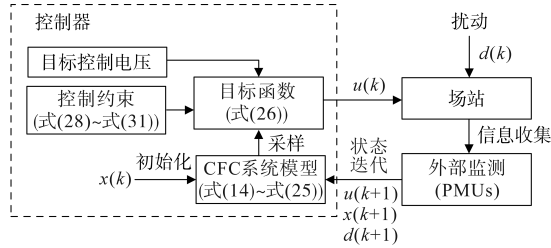


图7 非线性模型预测算法结构

Fig.7 Structure of nonlinear model predictive control algorithm

该算法应用于场站级控制,在场站外设置相量测量装置(phasing measurement units, PMUs),用于监测并传递受控输入、场站状态、扰动大小以及场站频率等关键信息。所提出的控制以系统模型出现的频率偏差作为动作依据,控制器目标函数以 T_s 为采样周期读取GFC模型的状态,对下一个周期的状态进行预测,并在一定时间间隔 T_p 下求解出最优点作为受控输入 $u(T_p \geq T_s)$,输入到外部场站^[23]。

在监测单元中,通过量测相邻母线状态对扰动 d 进行估算,关系式如下式所示:

$$d = \sum_{i=1}^n Y_i \omega_i \quad (12)$$

式中: Y_i 为线路实际导纳; ω_i 为角频率可利用低通滤波器估测母线电压相角的数值导数。

为了对上其他状态量的时序,受控输入 u 单独采用一个单位延迟模块进行局部测量,其余状

态量直接从GFC场站中读取。在监测模块向GFC系统模型反馈时,状态量进行下一轮迭代,直到控制目标 v_{dc}^m 达到稳定。

3.2 计及NMPC的GFC系统模型

首先考虑一个连接到 n 个总线的GFC,如图8所示。

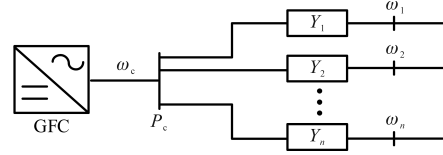


图8 连接至多总线的构网变流器

Fig.8 Grid-forming converter connected to multiple buses

为建立GFC的状态方程,设定一系列假设如下:

- 1)系统模型考虑系统的直流功率潮流。
- 2)设计PI控制器,将交流 (i_{ud}, i_{uq}) 控制回路简化为一阶传递函数,以时间常数 τ_{ac} 作为延迟跟踪电流参考点,如图9所示^[24]。图中, $\tau_{ac} = L/k_{pi} = R/k_{ii}$,其中, k_{pi}, k_{ii} 分别为控制器比例和积分增益。



图9 内部电流环的等效表示

Fig.9 Equivalent representation of inner current control loops

- 3)在场站模型中,假设 $v_q^* = 0$, i_q 为实时测量值; i_d 基于功率方程 $P_c = 3/2 v_d i_d$ 测得。

- 4)饱和度函数用双曲正切函数近似,该函数在开域内可微。

将GFC模型表示为受信号 u 影响的非线性系统,如下所示:

$$\mathbf{x}(t) = f[\mathbf{x}(t)] + g[\mathbf{x}(t)]u(t) \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{x} = [P_c, v_{dc}, v_d, v_q, x_{vd}, x_{vq}, i_{ud}, i_{uq}]^T$$

式中: $\mathbf{x}$ 为状态变量; u 为受控输入; f 为 $\mathbf{x}$ 的非线性函数; g 为与 $\mathbf{x}$ 无关的常数列向量。

该下垂型GFC通用模型的状态方程如下式:

$$P_c = Y[d_{pc}(P_c^* - P_c - u) + \omega_c^*] - \sum_{i=1}^n Y_i \omega_i \quad (14)$$

$$v_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \left[-G_{dc} v_{dc} + i_{dc}^{\max} \tanh \left(\frac{k_c (v_{dc}^* - v_{dc}) + \frac{P_d^*}{v_{dc}^*}}{i_{dc}^{\max}} \right) - \frac{P_d}{v_{dc}} \right] \quad (15)$$

$$v_d = \omega_c v_q + \frac{1}{C} (i_{ud} - i_d) \quad (16)$$

$$v_q = -\omega_c v_d + \frac{1}{C} (i_{uq} - i_q) \quad (17)$$

$$x_{vd} = -k_{pv}[\omega_c v_q + \frac{1}{C}(i_{ld} - i_d)] + k_{iv}(v^* - v_d) \quad (18)$$

$$x_{vq} = -k_{pv}[-\omega_c v_d + \frac{1}{C}(i_{lq} - i_q)] - k_{iv}v_q \quad (19)$$

$$i_{ld} = \frac{1}{\tau_{ac}}(i_d + x_{vd} - \omega_c C v_q - i_{ld}) \quad (20)$$

$$i_{lq} = \frac{1}{\tau_{ac}}(i_q + x_{vq} + C\omega_c v_d - i_{lq}) \quad (21)$$

$$\begin{cases} i_{ld}^* = i_d + x_{vd} - \omega_c C v_q \\ i_{lq}^* = i_q + x_{vq} + \omega_c C v_d \end{cases} \quad (22)$$

$$P_f = \frac{3}{2} \left[\frac{L}{\tau_{ac}} (i_{ld} i_{ld}^* - i_{ld}^2 + i_{lq} i_{lq}^* - i_{lq}^2) + R(i_{ld}^2 + i_{lq}^2) \right] \quad (23)$$

$$\begin{cases} P_d = P_c + P_f \\ i_d = \frac{2}{3} \frac{P_c}{v_d} \end{cases} \quad (24)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (25)$$

式中: d_{pc} 为下垂系数; $x_{vd,q}$ 为内部电压控制的 PI 控制器的状态。

P_f 为滤波环节的功率损耗,前项代表电流跟踪误差引起损耗,后项代表阻抗损耗。

外部监测模块通过专用通信通道在每个采样步长从场站读取状态,当检测到频率支撑需求后,触发 NMPC,自主调制受控输入 u 以提供支持。

3.3 NMPC 目标函数

NMPC 的控制目标是跟踪参考电压 v_{dc}^* ,并以直流电压稳定为前提对 u 进行限制,从而得到 NMPC 目标函数,如下式所示:

$$J[\mathbf{x}(t), u(t)] = w_1(v_{dc} - v_{dc}^*)(t + T_p) + \int_t^{t+T_p} w_2 u^2(\tau) d\tau \quad w_{1,2} \in \mathbf{R}_+ \quad (26)$$

在每一个步长 T_p 下对目标函数进行求解,如下式所示:

$$u^*(t:t+T_p) = \underset{u(\cdot)}{\operatorname{argmin}} J[\mathbf{x}(t), u(t)] \quad (27)$$

该函数考虑了场站模型、起始状态、输入控制和电流限制几方面的约束,分别为

$$\hat{\mathbf{x}}(\tau) = f[\hat{\mathbf{x}}(\tau)] + g[\hat{\mathbf{x}}(\tau)]u(\tau) \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(\tau = t) = \mathbf{x}(t) \quad (29)$$

$$u_{\min} \leq u(\tau) \leq u_{\max} \quad (30)$$

$$\|i_{dq}^*\| \leq i_{ac}^{\max} \quad (31)$$

从函数的优化流程可以看出,系统需要在采样周期 T_s 内求解系统优化问题 $u^*(t:t+T_p)$,对于该类连续时间优化问题,通过选取恰当的离散化

采样周期 T_s 和时间窗口 T_p ,实际可以以近似的思路解决应用中的连续时间优化问题。此外,系统对受控输入第一个采样所得样本将用于设置系统的起始受控输入,即 $u(t_k) = u^*(t_k)$ 。

3.4 NMPC 求解

NMPC 优化问题可以表述为 GFC 直流电压状态跟踪问题。由于状态初值和终值是已知,因此采用庞特里亚金的极大值定理^[25],该定理有助于在系统存在约束的情况下实现状态的最优控制输入^[24]。首先,将哈密顿函数定义为

$$\begin{aligned} H[\mathbf{x}(t), u(t), \boldsymbol{\lambda}(t), t] &= w_2 u^2(t) + \boldsymbol{\lambda}^T(t) \cdot \\ &\{f[\mathbf{x}(t)] + g[\mathbf{x}(t)]u(t)\} + e^{w_3(\|i_{dq}^*\| - i_{ac}^{\max})} \end{aligned} \quad (32)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}(t)$ 为一个时变的拉格朗日乘数; w_3 为哈密顿函数中对电流追踪的惩罚权重,用于约束参考电流与最大允许电流的偏差。

哈密顿函数通过寻找最优状态 $\mathbf{x}^*$ 、共状态 $\boldsymbol{\lambda}^*$ 和受控输入 u^* 来最小化哈密顿算子,作为最优受控输入的下界。因此,用庞特里亚金公式定义 NMPC 问题,如下式所示:

$$(\mathbf{x}^*, u^*, \boldsymbol{\lambda}^*) = \arg \min_{u(\cdot)} H \quad (33)$$

该函数考虑了状态动态、共态动态、采样步长间的连续性、共态的初值和终值的约束,如下式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})u \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\nabla_{\mathbf{x}} H^T \\ \mathbf{x}_i = \mathbf{x}(t_i) \\ \boldsymbol{\lambda}_{t_i}^T = -\boldsymbol{\mu}^T \\ \boldsymbol{\lambda}_{t_f}^T = 2\mathbf{M}\tilde{\mathbf{x}}(t_f) \end{cases} \quad (34)$$

其中, $\tilde{\mathbf{x}}(\tau) = \mathbf{x}(\tau) - \mathbf{x}(t)$,表示与参考状态 $\mathbf{x}(t)$ 的偏差; $\boldsymbol{\mu}$ 可在预估边界的开始处任意选取; $\mathbf{M} = \operatorname{diag}(w_4, w_1, w_4, \dots, w_4)$, w_1 和 w_4 均为正值, $w_1 \gg w_4$ 。通过对哈密顿算子微分处理,得到最优值 u^* :

$$u^* = \frac{Yd_{pc}\boldsymbol{\lambda}_1(1)}{2w_2} \quad (35)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda}_1(1)$ 代表第一个被采样的共状态变量的首次输入,状态和估计状态满足预测时间窗口 $[t, t+T_p]$ 的边界条件。因此可将状态方程和共态方程联合,将式(34)表示为两点边值问题,改写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})u \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\nabla_{\mathbf{x}} H^T \\ \mathbf{x}_i = \mathbf{x}(t_i) \\ \boldsymbol{\lambda}_{t_i}^T = 2\mathbf{M}\tilde{\mathbf{x}}(t_f) \end{cases} \quad (36)$$

求解该问题,可以给出 $\mathbf{x}$ 和 $\boldsymbol{\lambda}$ 的解,以利用式(35)对 u^* 进行求解。在纳入对受控输入的显式约束后, u^* 可通过下式求解:

$$u^* = \begin{cases} u_{\min} & \frac{Yd_{pc} \boldsymbol{\lambda}_1(1)}{2w_2} \leq u_{\min} \\ u_{\max} & \frac{Yd_{pc} \boldsymbol{\lambda}_1(1)}{2w_2} \geq u_{\max} \\ \frac{Yd_{pc} \boldsymbol{\lambda}_1(1)}{2w_2} & u_{\min} \leq \frac{Yd_{pc} \boldsymbol{\lambda}_1(1)}{2w_2} \leq u_{\max} \end{cases} \quad (37)$$

NMPC在扰动发生后启动,并使用预先确定的直流链路电压基准值来提供可量化的频率支持。控制的性能很大程度取决于 w_1, w_2 和 w_3 的选择。参照式(30),附加输入 u 有严格的上、下限,因此一般应取较小的 w_2 值和较大的 w_1 值,以提高对直流电压追踪误差项的权重,增强对电压变化的敏感度。为了保证交流电流的幅值能很快地达到极限值, w_3 应当取较大值。 w_4 代表系统其他状态对目标函数的影响,可选取较低的 w_4 以增强算法在快速频率支撑环节的解算精确度。

4 仿真验证

在Kundur 2区4机系统和IEEE 16机68线系统加入GFC,修改系统来验证所提出的NMPC控制和频率支撑功能。两个系统的正序相量模型在Matlab/Simulink中开发,GFC模型包含具有详细电压、电流环和频率控制部分以及配备励磁器和调速器的六阶同步发电机模型。电力系统通过代数模型建立。

4.1 Kundur 2区4机系统

将GFC加在2区4机系统的总线12处,设定该GFC发电量占系统总量的35%,调整后的4机系统如图10所示。

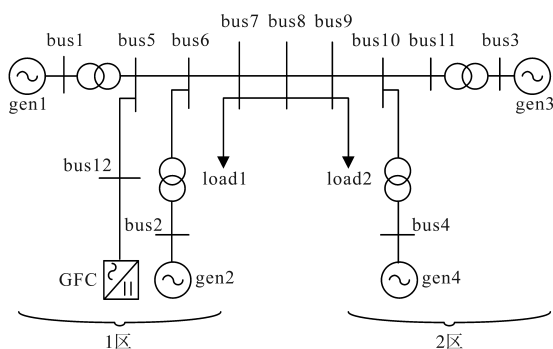


图10 Kundur 2区4机调整系统拓扑

Fig.10 Topology of modified Kundur 2-area 4-machine system

事件设定在 $t=0.1$ s时,总线7上负载阶跃至其标称工作值的1.25倍。无附加控制和有附加控制时总线12处GFC的电压和电流响应分别如图11和图12所示。

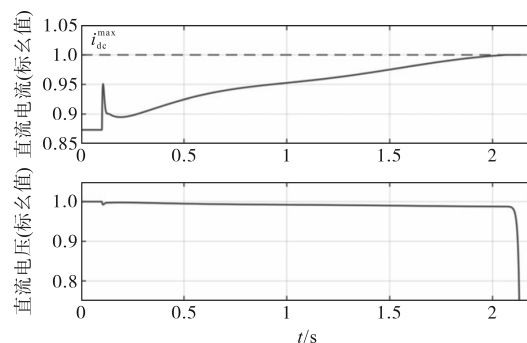


图11 Kundur系统中GFC的负荷事件响应(无附加控制)

Fig.11 GFC response to load event in Kundur system (without additional control)

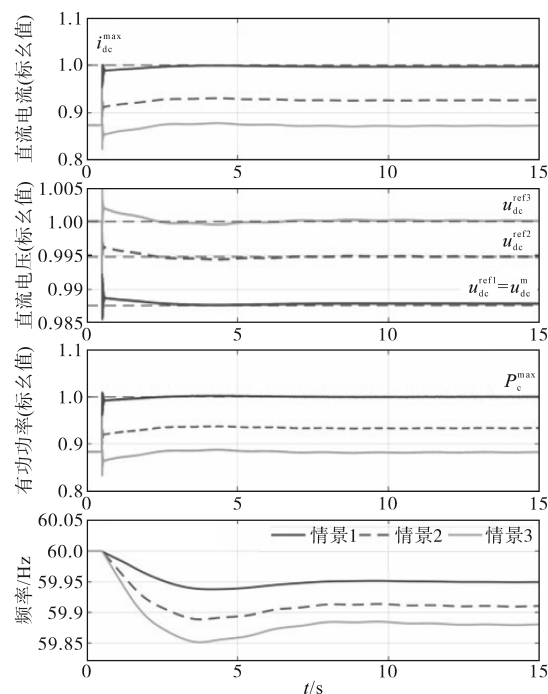


图12 Kundur系统中GFC的负荷事件响应(NMPC控制)

Fig.12 GFC response to load event in Kundur system (with NMPC control)

图11展示了无附加控制的情景,与之前的分析一致,电流随着有功需求增加而达到最大限制,此时GFC直流电压迅速下降,出现失稳现象。为体现所提方法的有效性,附加控制的情景如图12所示,GFC在事件发生后迅速稳定直流链路电压,使直流电流保持在其最大值来服务最大功率点。NMPC在负荷增加后保证了GFC迅速达到最大发电能力,改善了频率最低点指标和稳态下的频率偏差。

NMPC策略中的直流链路参考电压针对三种

情景可被设置为不同的值,即图 12 中的情景 1 (v_{dc}^{ref1})、情景 2 (v_{dc}^{ref2}) 和情景 3 (v_{dc}^{ref3})。情景 1 中的参考电压可使直流电流在稳态时达到其极限,最大限度支持电网的频率。情景 2 中,在扰动后的稳定状态下,GFC 不会利用所有余量,而是以大于扰动前的功率水平运行,因此,情景 2 相对情景 1 的频率最低点更低。情景 3 中,参考电压被设置为扰动之前的值,用于表明即使不提供频率支持,所提出的 NMPC 仍可以用于解决直流电压不稳定问题,提高了系统电压稳定性。

4.2 IEEE 16 机 68 线调整系统

IEEE 16 机 68 线系统是一个包含新英格兰测试系统(New England test system, NETS)、纽约电力系统(New York power system, NYPS)和其他三个小型区域的测试系统,在新英格兰测试系统和纽约电力系统各加入一个构网型变流器,命名为 GFC₁ 和 GFC₂,分别连接到总线 22 和总线 40 上,设置与其相连的有功电源占总发电量的 25%。调整后的 IEEE 16 机 68 线系统拓扑如图 13 所示。

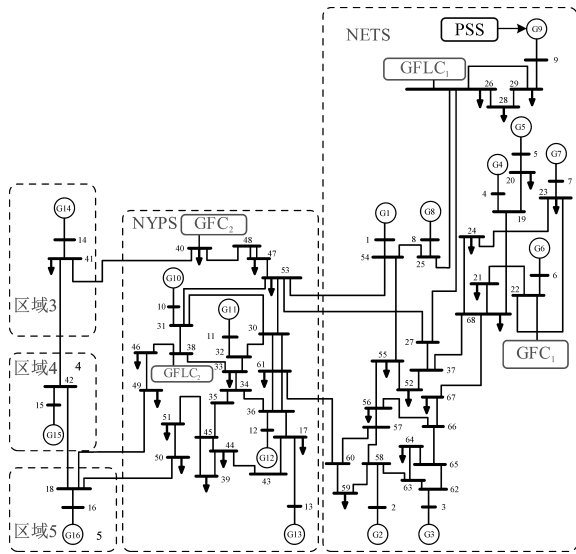


图 13 IEEE 16 机 68 线调整系统拓扑

Fig.13 Topology of modified IEEE 16-machine 68-node system

在该测试中,事件设定在 $t=0.1$ s 时,NETS 内部负载阶跃至其标称工作值的 1.25 倍。附加控制时总线 22 处直流电压和电流、GFC₁ 的功率响应及频率动态波形如图 14 所示。结果所揭示的结论与 Kundur 2 区 4 机系统一致,即 NMPC 控制器的集成可以调节干扰后的直流链路电压,以便向电网提供最大功率。如图 14 所示,随着负载的增加,即使直流电流达到极限,直流链路电压仍保持稳定。在频率动态中,同样展示了 NMPC 的三种控制情景。对比 Kundur 2 区 4 机系统中

GFC 的 35% 发电总量和 10% 发电余量,IEEE 16 调整系统中 GFC₁ 仅占发电总量的 5.5%,可用余量为 10%。这些仿真结果表现了 GFC 的发电总量占比和余量占比对改善频率动态的重要性,对比图 12 和图 14 的频率响应,可以显著地看出更高的 GFC 发电总量占比有利于改善系统频率动态。

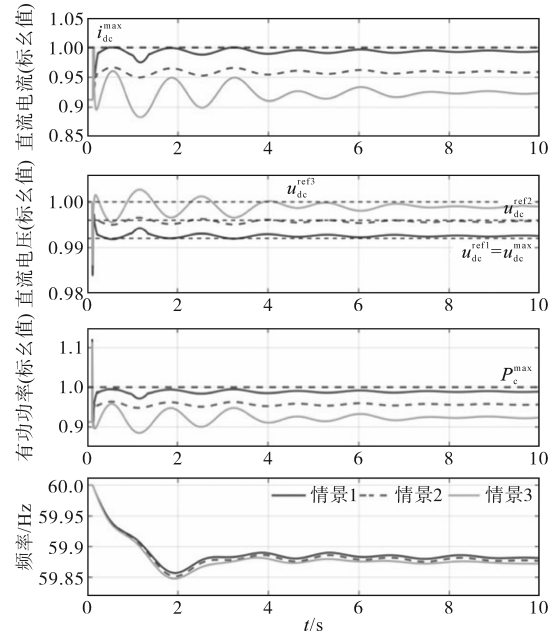


图 14 IEEE 16 机 68 线系统 GFC₁ 的负荷事件响应(NMPC 控制)

Fig.14 GFC₁ response to load event in IEEE 16-machine 68-node system (with NMPC control)

4.3 与滑模控制的比较

为凸显 NMPC 控制的特点,与具有类似功能的滑模控制(sliding model control, SMC)进行对比。滑模控制采用基于积分的方法跟踪直流链路电压,而 NMPC 控制采用成本函数。两种控制都具有维持直流链路电压稳定的能力,具有几乎重叠的频率动态。NMPC 和文献[16]中讨论的滑模控制的比较在 IEEE 16 机调整系统中进行,共同事件设置为 $t=0.1$ s 时的负载阶跃,这两种控制策略的响应如图 15 所示。

如图 15 所示,扰动后 NMPC 控制的交流电流从电流极限值脱离的速度较滑模控制更快。在这两种情况下,交流电流达到几乎相同的稳态值,远低于最大限制。NMPC 的受控输入在扰动后立即达到上限和下限,导致直流链路电压跟踪比滑模控制稍慢。然而,由于无法保证建立稳定的降阶系统,在文献[20]假设的系统中不可能对滑模控制器的控制输入施加这样的限制,相反,NMPC 算法的框架上允许在控制输入上包含显式约束。

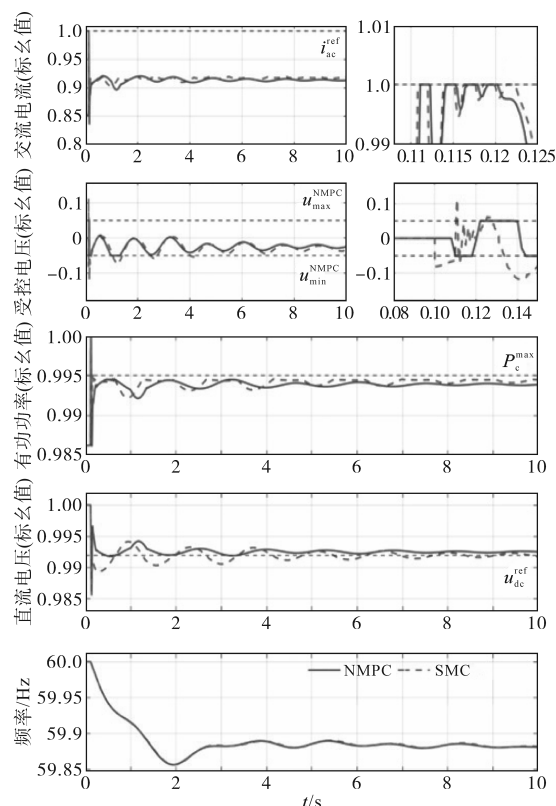


图15 IEEE 16机68线系统中GFC₁的负荷事件响应
(NMPC控制对比滑模控制)

Fig.15 GFC₁ response to load event in IEEE 16-machine 68-node system (NMPC control compared to SMC control)

5 结论

为了解决下垂型GFC直流链路在快速频率支撑时存在的电压不稳定问题,设计了一种基于NMPC的控制器。该NMPC模型结合了对状态和控制输入的约束,并利用来自GFC和相邻总线的信息作为输入。提出的控制器通过跟踪一个预定义的直流链路电压基准来支撑系统的频率稳定性。对比在控制输入上存在约束时不能保证稳定性的滑模控制,NMPC方法在控制设计中将这些约束明确考虑到系统设计中,避免了系统直流侧可能出现的电压稳定问题,提升了GFC对电力系统频率稳定性的支撑力度。

参考文献

[1] 闫炯程,李常刚,刘玉田.数据驱动的新型电力系统安全风险预警综述[J].电网技术,2024,48(12):4989-5002.
YAN Jiongcheng, LI Changgang, LIU Yutian. Review of data-driven security risk early warning research of the new-type power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4989-5002.

[2] 韩如磊,樊子铭,王粟,等.新型电力系统惯量支撑和调频响

应特性典型建模综述[J].电工电能新技术,2023,42(11):67-83.

HAN Rulei, FAN Ziming, WANG Su, et al. Review of typical modeling for inertial support and frequency regulation response characteristics of new-type power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(11): 67-83.

[3] DENHOLM P, MAI T, KENYON R W, et al. Inertia and the power grid: a guide without the spin[R]. Golden, CO (United States): National Renewable Energy Lab (NREL), 2020.

[4] 葛琛琛,陈俊儒,徐森,等.适用于频率和电压动态分析的构网型新能源场站聚合建模[J].上海交通大学学报,2024,58(10):1544-1553.

GE Chenchun, CHEN Junru, XU Sen, et al. Aggregation modeling of grid-forming renewable power plant for frequency and voltage dynamic analysis[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(10): 1544-1553.

[5] 刘辉,于思奇,孙大卫,等.构网型变流器控制技术及原理综述[J].中国电机工程学报,2025,45(1):277-296.

LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-296.

[6] GHOSH R, TUMMURU N R, RAJPUROHIT B S. A new virtual oscillator-based grid-forming controller with decoupled control over individual phases and improved performance of unbalanced fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12465-12474.

[7] 邹常跃,陈俊,魏伟,等.基于下垂控制的柔直变流器孤岛-并网控制模式切换方法[J].南方电网技术,2022,16(11):92-101.

ZOU Changyue, CHEN Jun, WEI Wei, et al. Method for switching of island-grid control mode for VSC-HVDC converter based on droop control[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(11): 92-101.

[8] 刘英培,石金鹏,梁海平,等.基于虚拟惯性频率调节的VSC-MTDC系统自适应下垂控制策略[J].可再生能源,2022,40(8):1081-1088.

LIU Yingpei, SHI Jinpeng, LIANG Haiping, et al. Adaptive droop control strategy for VSC-MTDC system based on virtual inertial frequency regulation[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(8): 1081-1088.

[9] 白国岩,李春宝,孟繁丞,等.多端柔性直流输电系统的自适应下垂控制策略研究[J].电气技术,2022,23(5):1-8.

BAI Guoyan, LI Chunbao, MENG Fancheng, et al. Research on an adaptive droop control strategy applied in voltage source converter based multi-terminal high voltage direct current transmission system[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(5): 1-8.

[10] SAMANTA S, CHAUDHURI N R. Stability analysis of grid-forming converters under DC-side current limitation in primary frequency response regime[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(4): 3077-3091.

- [11] TAYYEBI A, GROSS D, ANTA A, et al. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1004–1018.
- [12] TAYYEBI A, DÖRFLER F. Hybrid angle control and almost global stability of non-synchronous hybrid AC/DC power grids [C]//2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), IEEE, 2022: 7708–7713.
- [13] 尚磊, 唐王倩云, 苏适, 等. 构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 83–93.
SHANG Lei, TANG Wangqianyun, SU Shi, et al. Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 83–93.
- [14] CHEN M, ZHOU D, TAYYEBI A, et al. Generalized multivariable grid-forming control design for power converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2873–2885.
- [15] SAMANTA S, CHAUDHURI N R, LAGO A C M. Fast frequency support from grid-forming converters under DC-and AC-side current limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 38(4): 3528–3542.
- [16] 吕宪超. 基于滑模控制的飞轮储能直接功率母线电压控制策略研究[J]. 电工技术, 2024(7): 1–4.
LÜ Xianchao. Sliding mode control-based strategy for direct bus voltage control in flywheel energy storage[J]. Electric Engineering, 2024(7): 1–4.
- [17] SAMANTA S, CHAUDHURI N R. Stability analysis of grid-forming converters under DC-side current limitation in primary frequency response regime[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(4): 3077–3091.
- [18] 李尚志, 徐泰山, 李英彪, 等. 构网型全功率风机并网系统机电尺度建模及动态稳定性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(7): 12–21.
LI Shangzhi, XU Taishan, LI Yingbiao, et al. Electromechanical scale modeling and dynamic stability analysis of grid connected full power wind turbine system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(7): 12–21.
- [19] 和萍, 李钊, 李从善, 等. 基于虚拟同步机技术的储能机电暂态特性建模[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 11–22.
HE Ping, LI Zhao, LI Congshan, et al. Electromechanical transient modeling of energy storage based on virtual synchronous machine technology[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 11–22.
- [20] FREYTES J, LI J, DE P 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.
- [21] CHEN M, ZHOU D, TAYYEBI A, et al. On power control of grid-forming converters: modeling, controllability, and full-state feedback design[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 15(1): 68–80.
- [22] 朱虹熹, 尚磊, 王哲, 等. 基于故障恢复分析的构网变流器下垂控制策略[J/OL]. 电网技术: (2024-06-25)[2024-09-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0456>.
ZHU Hongxi, SHANG Lei, WANG Zhe, et al. Study on the droop control strategy of Grid-Forming converters based on fault recovery analysis[J/OL]. Power System Technology: (2024-06-25)[2024-09-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0456>.
- [23] HUANGFU Y, LI P, PANG S, et al. An improved energy management strategy for fuel cell hybrid vehicles based on Pontryagin's minimum principle[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 4086–4097.
- [24] KARUNARATNE L, CHAUDHURI N R, YOGARATHNAM A, et al. Nonlinear backstepping control of grid-forming converters in presence of grid-following converters and synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(1): 1948–1964.
- [25] 陈金玉, 陈大玮, 张抒凌, 等. 面向风电功率波动平抑的储能系统鲁棒模型预测控制[J]. 供用电, 2023, 40(8): 28–33.
CHEN Jinyu, CHEN Dawei, ZHANG Shuling, et al. Robust model predictive control of energy storage system for wind power fluctuation smoothing[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8): 28–33.

收稿日期: 2024-09-04

修改稿日期: 2024-12-01