

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240025

基于改进模型预测的并网变换器自适应虚拟惯性控制策略研究

郑峰¹, 苏明鸿¹, 陈静², 刘宝谨¹, 刘莞玲³, 梁宁⁴

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网兰州供电公司, 甘肃 兰州 730070; 3. 福州大学计算机与大数据学院, 福建 福州 350108; 4. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对低惯性直流微电网中母线电压易受网内功率波动影响的问题, 提出了一种基于改进模型预测的直流微电网并网变换器自适应虚拟惯性控制策略。首先, 电压外环引入自适应类虚拟同步发电机控制, 通过将控制方程中的虚拟惯性参数与电压变化率结合起来, 实现虚拟惯性参数的灵活可调。其次, 在电流内环引入模型预测控制, 并采用改进延时补偿算法, 实现对给定电流值快速跟踪的同时改善控制系统的动态特性。最后, 基于 Matlab/Simulink 建立了系统模型进行仿真。结果表明, 与传统的虚拟惯性控制策略相比较, 所提控制策略下的直流母线电压波动幅值更小且动态性能更佳, 可以有效提高直流母线电压的稳定性和直流微电网的惯性。

关键词: 直流微电网; 并网变换器; 自适应虚拟惯性控制; 模型预测控制

An adaptive virtual inertia control strategy for a grid-connected converter based on improved model prediction

ZHENG Feng¹, SU Minghong¹, CHEN Jing², LIU Baojin¹, LIU Wanling³, LIANG Ning⁴

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Grid Lanzhou Power Supply Company, Lanzhou 730070, China; 3. College of Computer and Data Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 4. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: There is a problem that the inertia of DC microgrid is low and it is easy for the voltage of a DC bus to be affected by power fluctuation in the network. Thus an adaptive virtual inertia control strategy based on improved model prediction for grid-connected converter of DC microgrid is proposed. First, adaptive analog virtual synchronous generator control is introduced into the voltage outer loop and, by combining the inertial parameters with the voltage change rate, flexible adjustment of the inertial parameters is realized. Secondly, model predictive control is applied in the current inner loop, along with an improved delay compensation algorithm, to achieve fast tracking of the desired current value and enhance the dynamic characteristics of the control system. Finally, a system model is established based on Matlab/Simulink for simulation. The results show that, compared with the traditional virtual inertia control strategy, the DC bus voltage fluctuation amplitude of the proposed control strategy is smaller and the dynamic performance is better. This can effectively improve the stability of the DC bus voltage and the inertia of the DC microgrid.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167010).

Key words: DC microgrid; grid-connected converter; adaptive virtual inertia control; model predictive control

0 引言

为了应对传统化石能源日益枯竭及由此带来的全球环境污染问题, 以太阳能、风能为代表的新能

源在配电网中的比例不断提高^[1-3]。可再生能源的推广促进了直流微电网的发展, 直流微电网因系统运行的高效性, 相较于交流微电网没有频率、功角稳定性等问题而受到广泛关注^[4-7]。然而直流微电网作为以变流器为主导的低惯性系统, 直流母线电压对网内功率波动十分敏感, 当网内出现如负载突变而

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52167010)

造成的扰动时,会引起直流母线电压波动,影响直流微电网的稳定运行^[8-10]。直流微电网通过双向并网变换器(bidirectional grid-connected converter, BGC)与交流电网连接, BGC 控制着直流微电网和交流电网之间的能量交换,对于稳定直流母线电压起着关键作用^[11-12]。

为了提高直流母线电压的稳定性,增强直流微电网的惯性,有学者提出适用于直流微电网 BGC 的虚拟惯性控制策略。目前关于 BGC 的虚拟惯性控制策略大概可以分为以下 3 类^[13-15]:改进下垂控制、附加微分惯性控制以及类虚拟同步发电机(analog virtual synchronous generator, AVSG)控制,其中 AVSG 控制是一种新型控制策略。文献[16]通过类比交流微电网中的 VSG 控制提出了适用于直流微电网的 AVSG 控制,该控制策略可以使 BGC 在直流微电网出现功率差额时迅速提供额外功率,有效抑制了直流母线电压波动,增强了直流微电网惯性,然而控制策略中惯量参数是恒定的,无法根据系统的动态情况进行自适应调节。为此文献[17]首先对惯性系数进行分析以评估其对系统惯性的影响,然后基于直流母线电压的暂态特征提出了自适应虚拟惯性参数的控制方法,然而并未具体区分小扰动和大扰动两种情况进行分析。

在以上所述的虚拟惯性控制策略中,电流内环仍采用传统的比例积分(proportion integration, PI)控制,但是对于非线性系统来说,采用 PI 控制难以获得良好的动态性能。为了获得更佳的动力性能,可以考虑在虚拟惯性控制策略中引入非线性算法。文献[18]在虚拟惯性控制策略中引入无源控制(passivity-based control, PBC),首先验证了 BGC 的无源性,然后从系统能量角度设计了电流内环无源控制器,实现对电流期望值的良好跟踪,但无源控制在系统受到干扰而导致系统模型和参数发生变化时跟踪效果不佳;文献[19]在无源控制的基础上引入滑模控制(sliding mode control, SMC),设计了 PBC-SMC 复合控制器,SMC 不易受到系统模型和参数变化的影响,同时可以有效改善直流微电网系统的动态性能,然而引入滑模算法可能会导致滑模抖振问题。随着计算机控制技术的发展,模型预测控制(model predictive control, MPC)被提出并在工业实际中得到了应用。MPC 根据当前系统的状态变量来预测计算系统下一时刻的输出,系统的实际输出会跟踪给定的参考值,具有良好的暂稳态特性。文献[20]提出了一种适用于电压源型 BGC 的 MPC 控制策略,通过实验验证了 MPC 具有更好的输出电能质量,但策略中并未引入虚拟惯性控制;文献

[21]提出了基于 MPC 的虚拟惯性控制策略,通过预测控制调节储能变换器的输出功率,为系统提供了快速惯性支撑,改善了系统的动态特性,但其控制单元是储能变换器,并未应用于 BGC 中;文献[22]提出了基于 MPC 的直流微电网虚拟惯性优化方法,通过预测方法求解虚拟惯性系数,进而实现系统的惯性优化,但其采用的是基于下垂截距调整的虚拟惯性控制,且 MPC 方法是用于求解控制单元的最优虚拟惯性系数值。

本文以 BGC 为研究对象,提出了一种基于改进模型预测的并网变换器自适应虚拟惯性控制策略。该策略在电压外环引入 AVSG 控制来为直流微电网提供虚拟惯性和阻尼,根据系统所受扰动的不同设计虚拟惯量参数自适应方程,通过将 AVSG 中的惯性参数与电压变化率结合来实现惯性参数的自适应调整;在电流内环引入带有延时补偿的 MPC 以实现对电流给定值的快速跟踪,改善控制系统的动态特性。构建了所提控制策略的小信号模型,进行了系统稳定性分析,通过理论与仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

1 直流微电网结构及控制策略

1.1 直流微电网结构

本文所研究的直流微电网的拓扑结构包括光伏单元、储能单元、交流主网、直流恒功率负载及相应的电力电子变换器,如图 1 所示。BGC 在直流微电网处于并网模式时负责平衡网内功率的盈亏;储能单元通过双向 DC-DC 变换器(bidirectional DC-DC converter, BDC)接入直流母线,采用电压电流双闭环控制;光伏单元通过 boost 变换器接入直流母线,采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制;直流恒功率负载通过 buck 变换器接入直流母线,采用定直流电压控制。

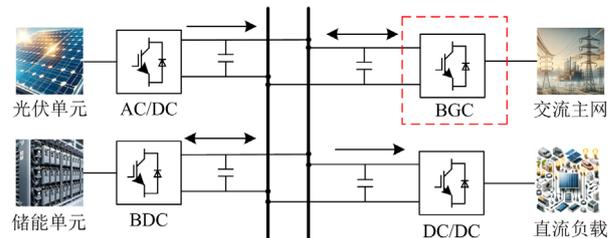


图 1 直流微电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of DC microgrid

本文重点分析了直流微电网在并网模式下 BGC 的运行控制策略,因此将直流微电网简化为图 2 所示的等效拓扑结构。在等效拓扑中,光伏单元、储

能单元及其相应的电力电子变换器可以等效为电流源 i_{cs} 。图 2 中: $Q_1 - Q_6$ 为绝缘栅双极晶体管 (insulate-gate bipolar transistor, IGBT); $u_k (k = a, b, c)$ 为三相交流电源的相电压; e_k 为并网变换器交流侧电压; i_k 为三相线电流; u_{bus} 为直流母线电压; i_{dc} 为直流侧电流; i_0 为直流侧输出电流; i_R 为流经负载的电流; L 为滤波电抗器的电感; R_L 为滤波电抗器的电阻; C 为直流侧电容器; R 为恒功率负载。

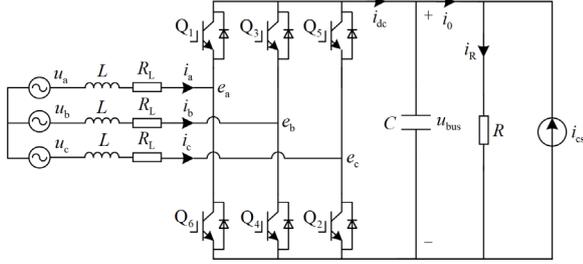


图 2 含 BGC 的直流微电网等效拓扑

Fig. 2 Equivalent diagram of DC microgrid with BGC

1.2 直流微电网传统控制策略

在诸多直流微电网系统协调控制方法中, 比较常用的一种传统控制策略是下垂控制, 典型的电压-电流下垂控制方程为

$$u_{dc}^* = u_0 - k_0 i_0 \quad (1)$$

式中: u_{dc}^* 为直流母线电压参考值; u_0 为 BGC 空载时直流侧端电压参考值; k_0 为下垂系数。

普遍的直流微电网下垂控制实现方式是将下垂曲线控制作为控制外环, 得到变换器输出直流电压的参考值, 再进行电压电流双闭环控制, 控制框图如图 3 所示。

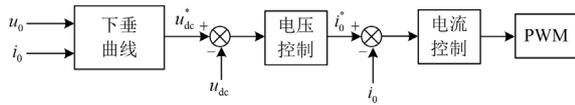


图 3 下垂控制框图

Fig. 3 Diagram of droop control

然而在实际应用中, 传统的下垂控制存在暂态响应时间长、响应超调量大、输出电压偏差大等缺陷。此外, 传统下垂控制是一种无惯性控制方法, 无法为直流微电网提供惯性和阻尼来提高系统的稳定性。

2 自适应虚拟惯性控制策略

2.1 电压外环虚拟惯性控制

在交流微电网中, VSG 控制技术通过引入虚拟惯量和阻尼, 使得逆变器能够模拟出与同步发电机类似的惯性特性、下垂特性和阻尼特性。假设同步

发电机的极对数为 1, 则 VSG 的机械方程可表示为

$$P_{set} - P_e - D_p(\omega - \omega_n) = J\omega \frac{d\omega}{dt} \approx J\omega_n \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

式中: P_{set} 、 P_e 分别为有功功率给定值和电磁功率; D_p 为频率阻尼系数; ω 、 ω_n 分别为 VSG 的角频率和电网额定角频率; J 为虚拟转动惯量。

当交流微电网频率发生突变时, 由于 J 的存在, 电网表现出较大的惯性, VSG 能够迅速调节有功输出, 从而实现电网频率支撑; D_p 描述了 VSG 的输出有功变化量与频率变化量之间的关系。而对于直流微电网来说, 其惯性表现为系统阻碍直流母线电压突变的能力。直流微电网中可以利用直流母线电容存储的电能 W_c 来阻碍直流母线电压突变, 其存储的电能可以表示为

$$W_c = \frac{1}{2} C u_{bus}^2 \quad (3)$$

然而直流微电网内存在网内功率波动, 当网内发生负载功率突变时可能会导致供电和负载之间的功率不匹配, 进而引起直流母线电压波动, 仅依靠直流母线电容存储的电能并不能平抑这种波动。

交流微电网和直流微电网有很多控制策略变量可以相互对应, 如表 1 所示。因此可以根据变量的对应性得到适用于直流微电网的 AVSG 控制方程。

$$i_{set} - i_0 - D_v(u_{bus}^* - u_n) = C_v u_{bus}^* \frac{du_{bus}^*}{dt} \approx C_v u_n \frac{du_{bus}^*}{dt} \quad (4)$$

式中: i_{set} 为 BGC 输出电流给定值; D_v 为电压阻尼系数; u_n 为直流侧电压额定值; u_{bus}^* 为虚拟惯性外环输出的直流母线电压参考值; C_v 为虚拟值。

表 1 交流、直流微电网控制变量类比

Table 1 AC and DC microgrid control variable analogy		
类比项	交流 VSG	直流 AVSG
下垂方程	$\omega - P$	$u - i$
控制目标	ω	u
输出量	P	i
惯量	J	C
储能	$0.5J\omega^2$	$0.5Cu^2$

通过式(4)可知, 当直流母线电压突变时, 由于 C_v 的存在, 直流微电网表现出较大的惯性, AVSG 能够迅速调节直流侧输出电流, 进而平抑直流母线电压波动。采用 AVSG 控制策略后, BGC 在直流侧虚拟出比实际电容值大的虚拟电容, 从而为直流微电网提供惯性支持。BGC 虚拟惯性外环控制框图如图 4 所示, 外环输出的直流电压参考值与实际值进行比较, 经过 PI 控制器后得到 BGC 并网电流的 d 轴

分量参考值 i_d^* 。

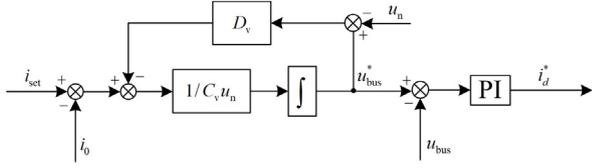


图 4 虚拟惯性外环控制框图

Fig. 4 Diagram of virtual inertial outer loop control

传统 AVSG 控制中, C_v 和 D_v 均为定值, 其惯性参数无法随着系统动态变化而自适应调整。对于实际运行的直流微电网而言, 当间歇性的电源或负载引起较大的功率扰动时, 会导致母线电压的变化率显著增加, 在这种情况下, 系统需要产生更大的虚拟惯性来抑制电压的波动; 反之当大扰动结束后系统逐步恢复稳定, 电压变化率变小, 此时较小的虚拟惯性有利于电压的迅速恢复。图 5 为负荷突减时直流母线电压变化率 dU_{dc}/dt 曲线, 在 t_1 到 t_2 的时间段内, dU_{dc}/dt 经历了一个急剧增加后再降至零后变为负值的过程, 这一阶段需要较大的虚拟惯性系数来抑制电压波动; 而在 t_2 到 t_3 的时间段内, dU_{dc}/dt 不大, 此时选择较小的虚拟惯性系数能够加速电压恢复; 在 t_3 时刻之后, 电压即将恢复正常, 为了平衡电压并促进其正常化, 此时可以适当增加惯性系数。

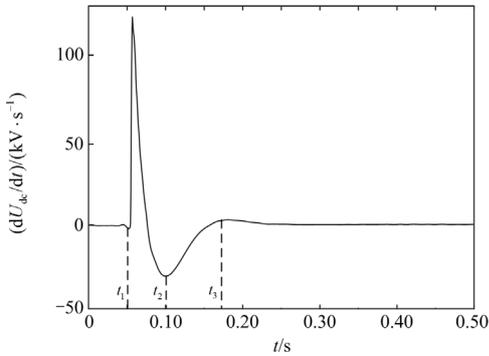


图 5 直流母线电压变化率曲线

Fig. 5 DC bus voltage change rate curve

为满足以上需求, 考虑将 AVSG 中的惯性系数与电压变化率结合起来, 提出自适应虚拟惯性控制策略, 实现惯性参数的灵活可调。本文所设计的虚拟惯量表达式为

$$C_v = \begin{cases} C_{v0}, & \left| \frac{dU_{dc}}{dt} \right| < M_0 \\ C_{v0} + k_1 \frac{dU_{dc}}{dt}, & M_0 \leq \left| \frac{dU_{dc}}{dt} \right| < M_1 \\ C_{v0} + k_2 \left| \frac{dU_{dc}}{dt} \right|^{k_3}, & \left| \frac{dU_{dc}}{dt} \right| \geq M_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_{v0} 是系统电压稳定状态下的虚拟电容值; M_0 、 M_1 为虚拟电容值改变时的电压阈值, 其值根据系统的设计标准而定; k_1 、 k_2 、 k_3 为灵活调节虚拟惯量的相关控制参数, 选取原则如下。

当 $dU_{dc}/dt < M_0$ 时, C_v 为固定值 C_{v0} , 避免了惯量参数的频繁切换。当 $dU_{dc}/dt > M_0$ 时, C_v 是一个包含 dU_{dc}/dt 的表达式, 此时根据 dU_{dc}/dt 改变惯量参数, 即根据系统的动态情况进行自适应调节。在参数 k_1 的选择上, k_1 为电容值线性变化的调整系数, 此时电压变化率不大, 期望较小的虚拟惯性, 可以选择较小的 k_1 , 本文选取 $k_1 = 0.1$; 在 k_2 、 k_3 的选择上, 当系统受到大扰动时, 此时电压变化率较大, 期望较大的虚拟惯性, 因此需要根据系统的实际运行状态和暂态性能要求增大 k_3 的取值来增加虚拟电容值, 选定 k_3 后再根据系统的稳定性要求选取 k_2 。图 6 显示了 k_2 和 k_3 的变化对虚拟电容值的影响, 本文选取 $k_2 = 0.2$ 、 $k_3 = 3$ 。

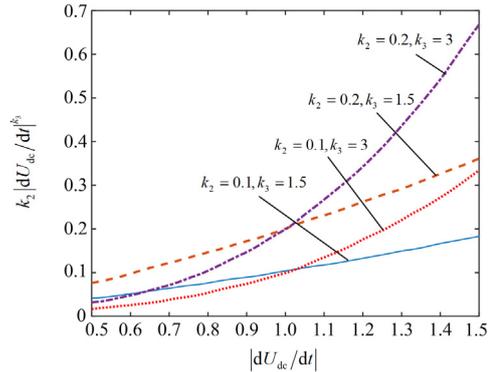


图 6 k_2 和 k_3 的变化对虚拟电容值的影响

Fig. 6 Influence of the change of k_2 and k_3 on the value of virtual capacitance

引入自适应虚拟惯性后, 可以得到如图 7 所示的外环控制框图。

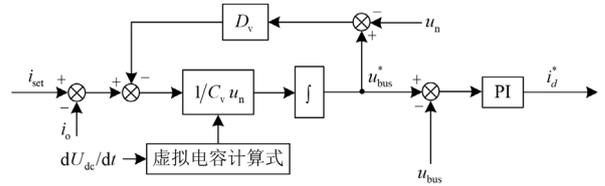


图 7 自适应虚拟惯性外环控制框图

Fig. 7 Diagram of adaptive virtual inertial outer loop control

2.2 电流内环模型预测控制

BGC 通常采用 PI 控制实现电压和电流的双闭

环控制结构。但传统的基于 PI 的电流控制往往依赖于电流的实际测量值进行滞后反馈调整, 导致动态响应不佳。同时, PI 参数的设定对电流跟踪能力有显著影响, 这对于应用 AVSG 控制的 BGC 系统而言, 可能会降低惯性控制的效果。因此, 本文设计了一种基于改进模型预测的 BGC 自适应虚拟惯性策略, 利用 BGC 中电感电流的数学表达式, 建立电感电流的预测模型, 实现对电感电流参考值的良好跟踪, 消除传统电流内环 PI 控制器及 PWM 调节器, 提高控制系统的动态特性。

2.2.1 电流模型预测控制原理

对于两电平三相 BGC 的拓扑结构, 每个开关管的取值要么为 0, 要么为 1。为了避免每个桥臂开关管直接导通, 通常将每个桥臂设计为两个互补的开关管, 从而得到 BGC 的共 $8(2^3)$ 种有效的开关组合, 模型预测控制系统结构图如图 8 所示。

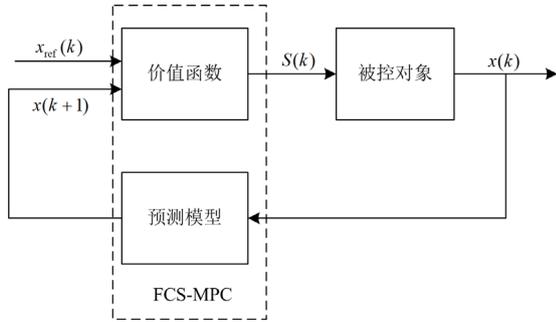


图 8 模型预测控制系统结构图

Fig. 8 Structure diagram of MPC

图 8 中: $x_{ref}(k)$ 代表参考输出信号; $S(k)$ 表示从 k 到 $k+1$ 期间由 BGC 触发的开关序列, 与预测模型的输出信号相对应; $x(k+1)$ 表示备选的预测输出信号。模型预测控制的具体算法过程可以描述为: 在 k 时刻, 采样模块测量 BGC 的输出状态, 并将测得的电气量信息反馈到预测模型中; 根据采集到的电气量, 预测模型计算出所有备选的 $x_i(k+1)$ 在 $k+1$ 时刻的预测输出信号; 价值函数将每个备选的预测输出信号与参考信号进行比较, 并选择使价值函数最小的开关序列。

2.2.2 BGC 电流预测模型

假设网侧三相电源对称, 开关器件为理想器件, 并定义开关函数为

$$S_k = \begin{cases} 1, k \text{ 相上桥臂开通且下桥臂关断} \\ 0, k \text{ 相上桥臂关断且下桥臂开通} \end{cases} \quad (6)$$

根据图 2 可以得到 BGC 在三相下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - R_L i_a - e_a \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - R_L i_b - e_b \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - R_L i_c - e_c \\ C \frac{du_{bus}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_0 \end{cases} \quad (7)$$

经过 abc/ $\alpha\beta$ 坐标变换, BGC 两相解耦表达式为

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = u_\alpha - e_\alpha - R_L i_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = u_\beta - e_\beta - R_L i_\beta \\ C \frac{du_{bus}}{dt} = S_\alpha i_\alpha + S_\beta i_\beta - i_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_α 和 u_β 是三相电网电压 u_a 、 u_b 和 u_c 在 $\alpha\beta$ 轴的分量; i_α 和 i_β 是三相并网电流 i_a 、 i_b 和 i_c 在 $\alpha\beta$ 轴的分量; e_α 和 e_β 是三相电网电压 e_a 、 e_b 和 e_c 在 $\alpha\beta$ 轴的分量; S_α 和 S_β 是开关函数在 $\alpha\beta$ 轴的分量。

为了建立 BGC 的预测模型, 在 k 、 $k+1$ 时刻对连续模型式(8)进行离散化, 整理得

$$\begin{cases} i_\alpha(k+1) = \frac{T_s(u_\alpha(k) - e_\alpha(k) - R_L i_\alpha(k))}{L} + i_\alpha(k) \\ i_\beta(k+1) = \frac{T_s(u_\beta(k) - e_\beta(k) - R_L i_\beta(k))}{L} + i_\beta(k) \end{cases} \quad (9)$$

BGC 交直流两侧的电压关系为

$$\begin{cases} e_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(S_a - \frac{1}{2} S_b - \frac{1}{2} S_c \right) u_{bus} \\ e_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} (S_b - S_c) u_{bus} \end{cases} \quad (10)$$

式中, T_s 为采样周期。由于 BGC 共有 8 种开关运行状态, 根据式(10)可得每一种状态对应的 e_α 和 e_β 值, 如表 2 所示。将表 2 的 e_α 和 e_β 值代入式(9), 可得 $k+1$ 时刻的 $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$ 值。将变换器的输入电流作为控制对象, 则系统价值函数表达式为

$$\begin{cases} f_1 = (i_\alpha^* - i_{\alpha 1}(k+1))^2 + (i_\beta^* - i_{\beta 1}(k+1))^2 \\ f_2 = (i_\alpha^* - i_{\alpha 2}(k+1))^2 + (i_\beta^* - i_{\beta 2}(k+1))^2 \\ \vdots \\ f_8 = (i_\alpha^* - i_{\alpha 8}(k+1))^2 + (i_\beta^* - i_{\beta 8}(k+1))^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中, i_α^* 和 i_β^* 是参考电流。比较式(11)所得的 8 组价值函数值, 取其最小值 f_{min} , 将满足最小价值函数值的一组开关序列 S_a 、 S_b 、 S_c 作用于变换器。

由此可以得到电流内环控制框图，如图 9 所示。

表 2 开关状态与输出电压之间的关系

Table 2 Relationship between the switching state and the output voltage component

开关状态	S_a	S_b	S_c	e_α	e_β
1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	$0.8165U_{dc}$	0
3	0	1	0	$0.4083U_{dc}$	$0.7071U_{dc}$
4	0	1	1	$0.4083U_{dc}$	$0.7071U_{dc}$
5	1	0	0	$0.8165U_{dc}$	0
6	1	0	1	$0.4083U_{dc}$	$0.7071U_{dc}$
7	1	1	0	$0.4083U_{dc}$	$0.7071U_{dc}$
8	1	1	1	0	0

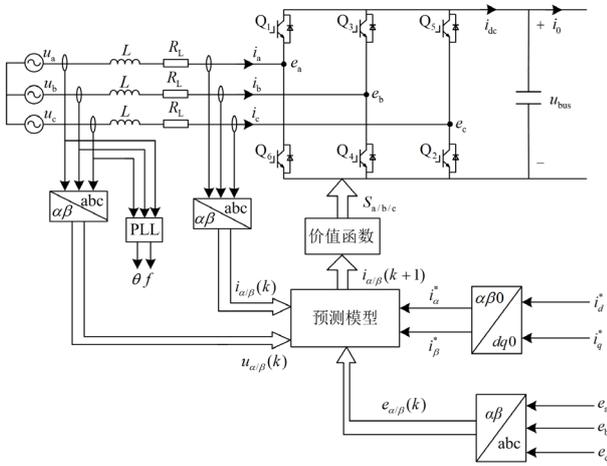


图 9 电流内环控制框图

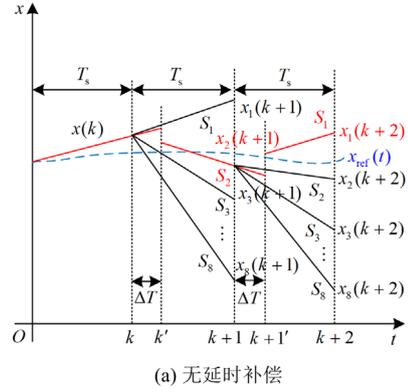
Fig. 9 Diagram of current inner loop control

2.2.3 改进模型预测控制

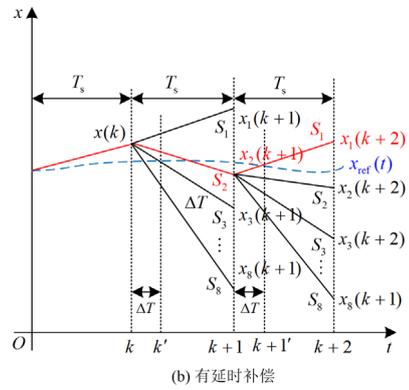
控制延时是预测控制方法面临的主要问题之一，由于在现实应用中，预测控制算法需要进行大量的计算，不可避免地会引入输入和优化驱动之间的时间延迟，控制延时会使下一时刻的预测值产生误差，对预测控制算法的性能和稳定性产生影响。因此为了得到更好的控制性能，需要对预测控制方法进行改进，引入延时补偿。

考虑到预测算法具有多步预测特性，可以利用这一点对算法进行改进，无延迟补偿和有延迟补偿的 FCS-MPC 算法运行过程如图 10 所示，有延迟补偿的 MPC 算法流程图如图 11 所示。在未采用延时补偿时，图 10(a)中在 $k+1$ 至 $k+1'$ 时段内使用的开关序列仍是上一控制周期计算得到的最优开关序列，循环反复将导致输出逐渐偏离参考值，输出电能质量变差；而采用延时补偿后，图 10(b)中在 $k+1$ 至 $k+1'$ 时段内使用的开关序列是下一控制周期计算

得到的最优开关序列，可使作用的开关序列与预测模型的预测时段相一致，进而改善输出的电能质量。



(a) 无延时补偿



(b) 有延时补偿

图 10 无延迟补偿和有延迟补偿的 FCS-MPC 算法运行过程

Fig. 10 Process of FCS-MPC algorithm with and without delay compensation

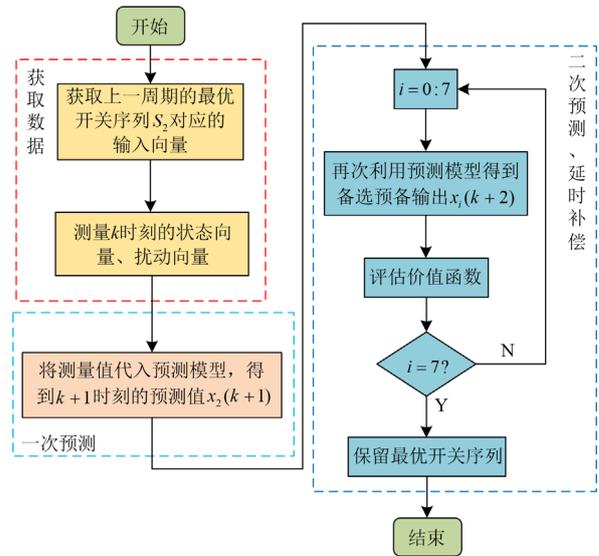


图 11 有延时补偿的 MPC 算法流程图

Fig. 11 Flow chart of MPC algorithm considering delay compensation

1) 在 k 时刻, 应用由前一个控制周期算出的最优开关序列 S_2 ;

2) 测量变换器在 k 时刻的状态向量和扰动向量, 将与 S_2 对应的输入向量代入变换器的预测模型进行预测, 得到 $k+1$ 时刻的最佳输出向量 $x_2(k+1)$;

3) 从 $x_2(k+1)$ 开始, 基于预测模型对 $k+2$ 时刻的 8 组候选输出向量进行预测, 利用价值函数对候选输出向量进行评估, 选择使价值函数最小的开关序列 S_1 ;

4) 在 $k+1$ 时刻执行最优开关序列。

3 稳定性分析

根据式(4)、式(5)和式(9)可以得到 BGC 系统控制策略框图, 如图 12 所示。

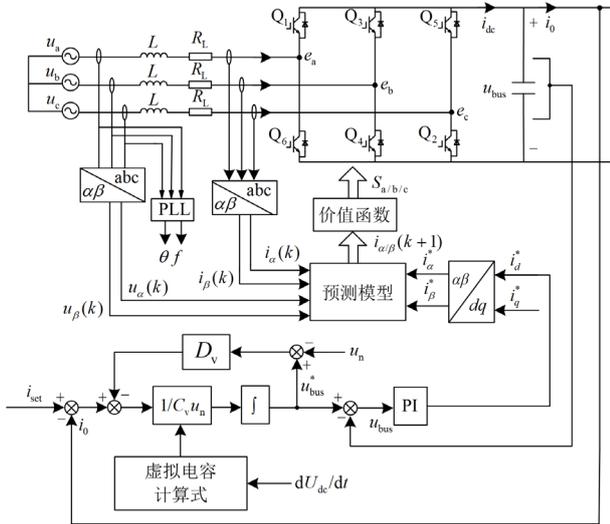


图 12 BGC 控制框图

Fig. 12 Control block diagram of BGC

为研究 BGC 系统采用本文所提控制策略后的稳定性, 对 BGC 系统进行小信号建模和分析。将式(4)中的状态变量写成稳态值和小扰动之和, 即

$i_0 = I_0 + \Delta i_0$, $u_{bus}^* = U_{bus}^* + \Delta u_{bus}^*$, 可得虚拟惯性控制方程的小信号方程。

$$-\Delta i_0 - D_v \Delta u_{bus}^* = C_v u_n \frac{d\Delta u_{bus}^*}{dt} \quad (12)$$

设定 BGC 以单位功率因数运行, 不向电网输送无功功率, 即无功电流 $i_q = 0$ 。根据 BGC 交直流两侧功率平衡有

$$\begin{cases} \frac{3}{2} u_d i_d = u_{bus} i_{dc} \\ i_{dc} = i_0 + C \frac{du_{bus}}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)中的状态变量写成稳态值和小扰动之和, 即 $i_d = I_d + \Delta i_d$ 、 $u_{bus} = U_{bus} + \Delta u_{bus}$ 、 $i_0 = I_0 + \Delta i_0$ 、 $u_d = U_d + \Delta u_d$, 忽略电网电压扰动项及二次扰动项, 式(13)的小信号方程为

$$\frac{3}{2} U_d \Delta i_d = U_{bus} \left(C \frac{d\Delta u_{bus}}{dt} + \Delta i_0 \right) + \Delta u_{bus} I_0 \quad (14)$$

根据叠加定理, 忽略扰动项 Δi_d , 对式(14)进行 Laplace 变换可得 Δu_{bus} 和 Δi_0 之间的关系为

$$\frac{\Delta u_{bus}(s)}{-\Delta i_0(s)} = \frac{U_{bus}}{s C U_{bus} + I_0} = G_1(s) \quad (15)$$

同理, 忽略扰动项 Δi_0 , 对式(14)进行 Laplace 变换可得 Δu_{bus} 和 Δi_d 之间的关系为

$$\frac{\Delta u_{bus}(s)}{\Delta i_d(s)} = \frac{3 U_d}{2(s C U_{bus} + I_0)} = G_2(s) \quad (16)$$

由此得到的 BGC 系统小信号模型如图 13 所示, 其中 $G_v(s) = k_p + k_i/s$, k_p 和 k_i 分别为 PI 控制器的比例常数和积分常数, 采用典型二阶系统参数整定方法进行参数整定。

由于内环采用模型预测算法, 考虑到算法的跟踪精度和快速性, 同时引入了延时补偿, 可以认为变换器输出电流与参考电流值是实时相等的^[23], 即 $\Delta i_d = \Delta i_d^*$, 由此可以得到简化后的小信号模型, 如图 14 所示。

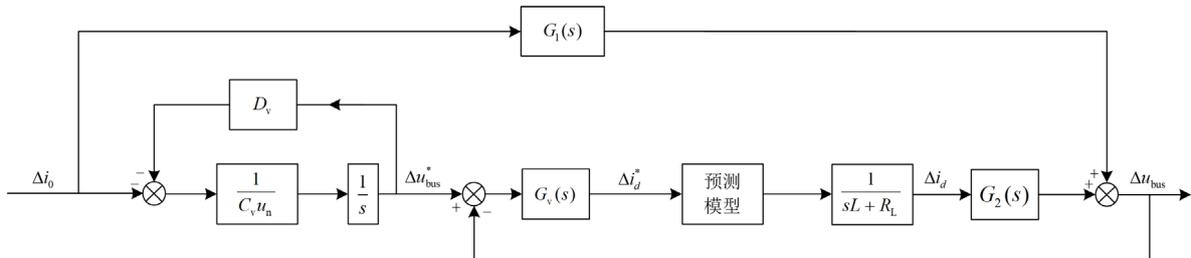


图 13 BGC 系统小信号模型

Fig. 13 Small signal model of BGC system

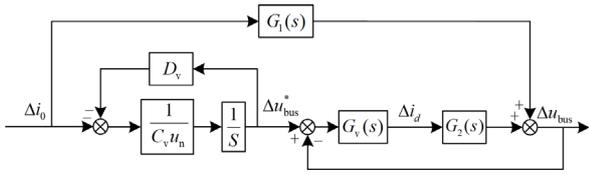


图 14 BGC 系统简化小信号模型

Fig. 14 BGC system simplified small signal model

根据图 14 可以得到 Δu_{bus} 和 Δi_0 的之间的传递函数，如式(17)所示。

$$G(s) = -\frac{\Delta u_{bus}(s)}{\Delta i_0(s)} = -\frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} a_2 = 2C_v U_n U_{bus} \\ a_1 = 2D_v U_{bus} + 3U_d k_p \\ a_0 = 3U_d k_i \\ b_3 = 2CC_v U_n U_{bus} \\ b_2 = 2C_v U_n I_0 + 2CD_v U_{bus} + 3U_d C_v U_n k_p U_{bus} \\ b_1 = 2D_v I_0 + 3U_d D_v k_p + 3U_d C_v U_n k_i \\ b_0 = 3U_d D_v k_p \end{cases} \quad (18)$$

根据式(17)可以绘制 BGC 闭环控制系统的零极点图。图 15 为给定电压阻尼系数 D_v 下，取不同虚拟电容值 C_v 时的系统主导极点分布图。

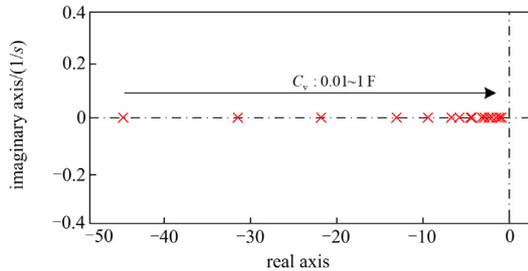


图 15 不同 C_v 下 BGC 系统极点分布图

Fig. 15 Pole distribution map of BGC under different C_v

由图 15 可以看出，在所提出的控制策略下，BGC 系统的所有变化极点的实部均小于零，极点逐渐向虚轴靠近但不会越过虚轴进入右半平面，因此当 C_v 在一定范围内变化时不会对 BGC 系统的稳定性造成影响。

同理绘制给定虚拟电容值 C_v 下，取不同电压阻尼系数 D_v 时系统的主导极点分布图如图 16 所示，同样可以看出，当 D_v 在一定范围内变化时也不会对 BGC 系统的稳定性造成影响。

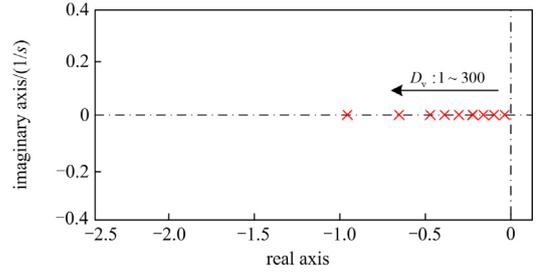


图 16 不同 D_v 下 BGC 系统极点分布图

Fig. 16 Pole distribution map of BGC under different D_v

4 仿真分析

为了验证本文所提控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了如图 2 所示的直流微电网仿真模型，仿真参数如表 3 所示。

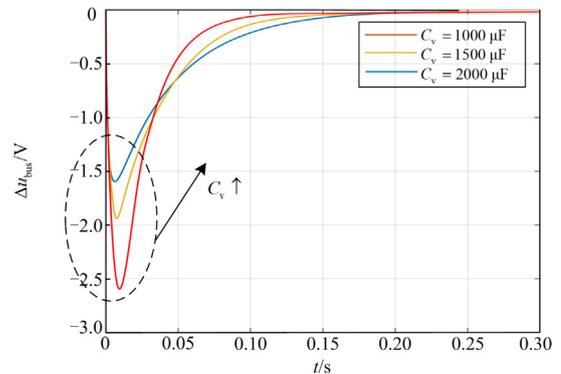
表 3 系统仿真参数

Table 3 System simulation parameter

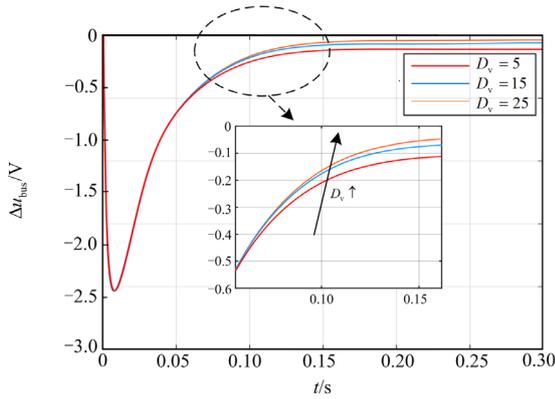
仿真参数	数值
三相电网相电压 $e_k (k = a, b, c) / V$	220
母线电压额定值 u_n / V	800
滤波电感 L / mH	3
滤波电阻 R_l / Ω	0.05
直流侧电容 $C / \mu F$	5000
初始恒功率负载 R / kW	10
稳态虚拟电容值 $C_v / \mu F$	1500
电压阻尼系数 D_v	5
比例系数 k_p	10
积分系数 k_i	120

4.1 不同虚拟惯量下的阶跃响应

图 17(a)为给定阻尼系数 D_v 下取不同虚拟电容值 C_v 时的 Δu_{bus} 阶跃响应仿真结果，图 17(b)为给定虚拟电容值 C_v 下取不同阻尼系数 D_v 时的 Δu_{bus} 阶跃响应仿真结果。



(a) 不同虚拟电容值的阶跃响应



(b) 不同虚拟阻尼值的阶跃响应

图 17 不同虚拟惯量的单位阶跃响应

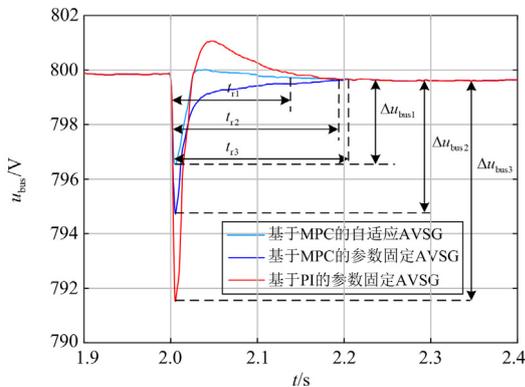
Fig. 17 Unit step response of different virtual inertia

由图 17(a)可以看出, 随着 C_v 值的增加, 直流母线电压下降的幅度逐渐减小, 电压恢复时间逐渐增加, 说明直流微电网的惯性得到了增强。此外, C_v 值越大, 直流母线电压下降的幅值越小, 直流母线电压变化越平缓, 直流微电网的惯性越强, 然而过大的 C_v 值会导致电压恢复时间过长。由图 17(b)可以看出, 随着 D_v 值的增加, 直流母线电压的稳态值误差逐渐减小, 可见 D_v 主要影响直流母线电压的稳态值。

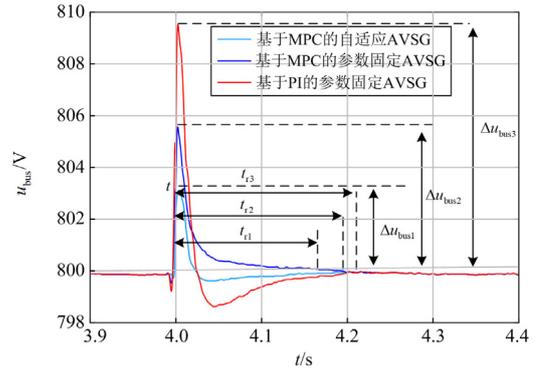
4.2 负载突变下的直流母线动态响应

图 18 为在基于 PI 的参数固定 AVSG、基于 MPC 的参数固定 AVSG 和基于 MPC 的自适应 AVSG 控制策略下, 恒功率负载突增和突减时直流母线的动态响应图。表 4 和表 5 给出了相应的直流母线动态响应指标。

仿真过程中, 恒功率负荷在 $t = 2\text{ s}$ 时瞬间突增 10 kW , 随后在 $t = 4\text{ s}$ 时突减 10 kW 。由表 4 和表 5 可知, 在基于 PI 的参数固定 AVSG、基于 MPC 的参数固定 AVSG 和基于 MPC 的自适应 AVSG 控制策略下, 当负载突然增大时, 电压波动幅值分别为



(a) 负载突增



(b) 负载突减

图 18 负载突变时的母线动态响应

Fig. 18 DC bus dynamic response during load transients

8.5 V 、 5.2 V 和 3.4 V , 电压恢复时间分别为 0.21 s 、 0.19 s 和 0.14 s ; 当负载突然减小时, 电压波动幅值分别为 9.5 V 、 5.7 V 和 3.2 V , 电压恢复时间分别为 0.22 s 、 0.19 s 和 0.16 s 。由图 18 也可以看出, 在 3 种控制策略中, 基于 MPC 的自适应 AVSG 控制策略同时具有最小的电压波动幅值、最短的电压恢复时间和最优的动态性能。

表 4 恒功率负载突增时直流母线动态响应指标

Table 4 DC bus dynamic response index when constant power load suddenly increases

控制策略	电压波动幅值/V	电压恢复时间/s
PI+固定 AVSG	8.5	0.21
模型预测+固定 AVSG	5.2	0.19
模型预测+自适应 AVSG	3.4	0.14

表 5 恒功率负载突减时直流母线动态响应指标

Table 5 DC bus dynamic response index when constant power load suddenly decreases

控制策略	电压波动幅值/V	电压恢复时间/s
PI+固定 AVSG	9.5	0.22
模型预测+固定 AVSG	5.7	0.19
模型预测+自适应 AVSG	3.2	0.16

上述结果表明, 所提出的基于 MPC 的自适应 AVSG 控制策略能够有效抑制 BGC 系统在网内功率扰动时的直流母线电压波动。自适应虚拟惯量的引入可以减小电压波动幅值、增强直流微电网的惯性以及平抑母线电压波动, 从而提高直流母线电压的稳定性。

4.3 网侧电压电流波形及 THD 分析

3 种控制策略下网侧的电流和电压波形以及网侧电流总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD) 如图 19 所示。

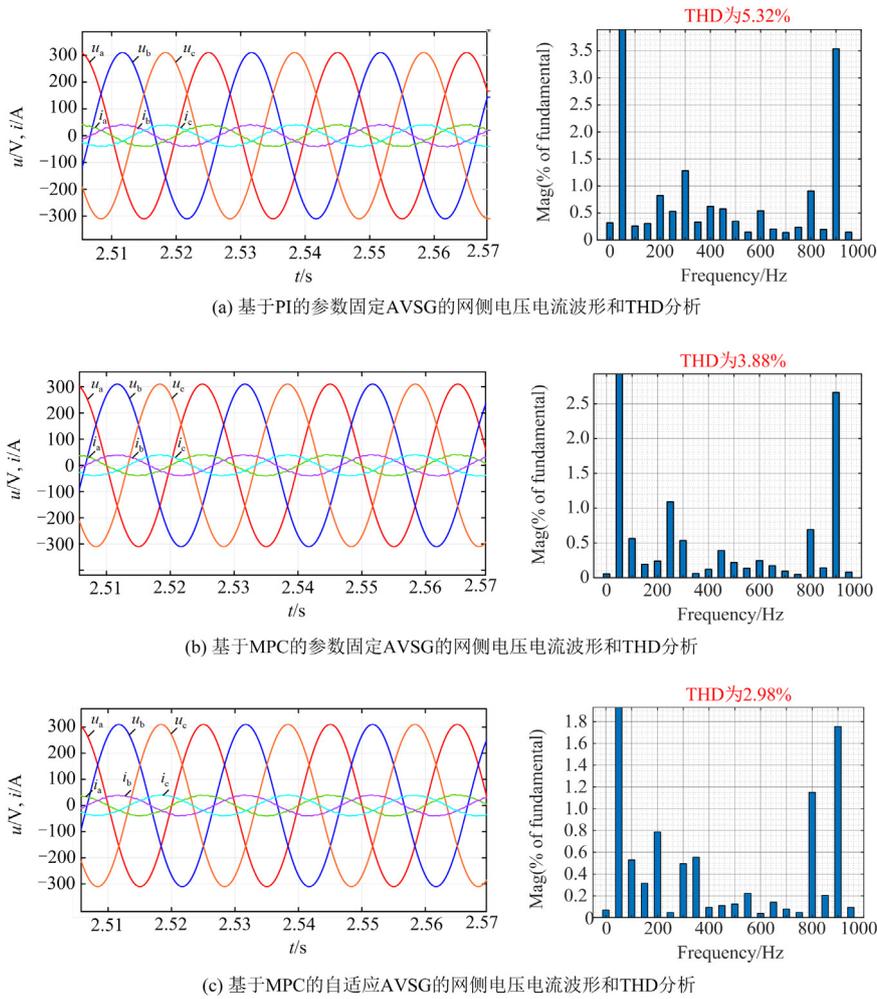


图 19 3 种控制策略下的网侧电压电流波形及 THD 分析

Fig. 19 Grid-side voltage and current waveforms and THD analysis under three control strategies

可以观察到，网侧电压和电流呈现良好的正弦波形，且畸变很小。由 THD 分析可知，在基于 PI 的参数固定 AVSG、基于 MPC 的参数固定 AVSG 和基于 MPC 的自适应 AVSG 控制策略下的 THD 分别为 5.32%、3.88%和 2.98%，可见基于 MPC 的自适应 AVSG 控制策略的网侧电流总谐波畸变率最低，表明该控制策略下网侧电能质量最好。

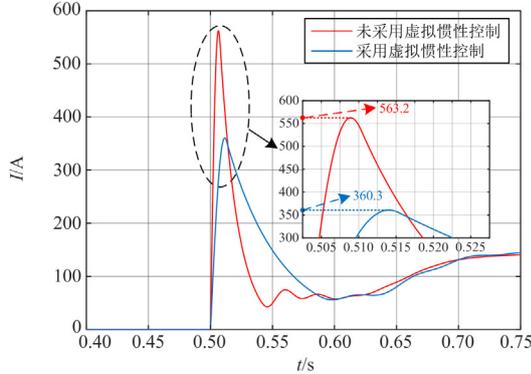
4.4 虚拟惯性控制下的极间故障响应

直流系统中最严重的故障之一是直流极间短路故障。当 BGC 系统发生极间短路故障时，直流母线电压在几毫秒内迅速降为零。采用本文所提的虚拟惯性控制策略可在直流系统发生极间短路故障时限制了故障电流的增长，降低直流母线电压的下降速率。由于发生故障时直流母线电压会在几毫秒内迅速降为零，在此条件下，自适应参数 AVSG 与固定参数 AVSG 控制策略的性能差别不大，故仿真采

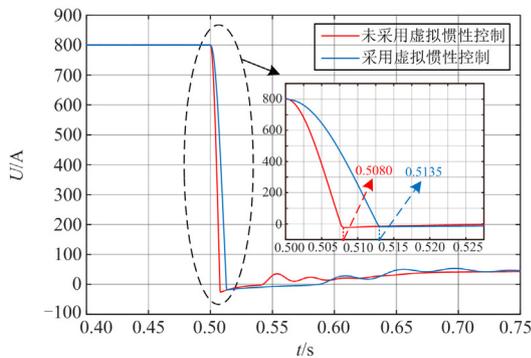
用固定参数 AVSG 控制。设置系统在 $t = 0.5 \text{ s}$ 时发生极间短路故障，图 20 显示了极间故障下，未采用虚拟惯性控制和采用本文所提虚拟惯性控制的故障电流和电压波形对比。

从图 20(a)可以看出，当 BGC 系统不采用虚拟惯性控制时，由于直流侧电容的快速放电，故障发生后故障电流迅速增加，故障电流峰值达到 563.2 A，而采用本文所提虚拟惯性控制时，故障电流上升速率变缓，电流峰值降低至 360.3 A。相比于无虚拟惯性控制的场景，故障电流峰值降低了 202.9 A，这有助于避免过大的短路电流冲击，防止器件烧毁，提高电力系统的设备安全性和可靠性。从图 20(b)可以观察到，当 BGC 系统不采用虚拟惯性控制时，由于直流侧电容的快速放电，故障发生后直流电压迅速下降，在 8 ms 内，电压降为零。然而，当采用本文所提虚拟惯性控制时，直流母线电压下降速率变慢，达到零值所需时间约 13.5 ms，与

不采用虚拟惯性控制的场景相比, 下降时间延长了 5.5 ms, 较长的过零时间为系统控制和保护设备提供了更多的响应时间, 有利于帮助系统更快地识别和隔离故障。



(a) 不同控制下的故障电流波形



(b) 不同控制下的故障电压波形

图 20 有无虚拟惯性控制下直流电压和电流的动态响应

Fig. 20 Dynamic responses of DC voltage and current with and without virtual inertia control

5 结论

为改善直流母线电压的动态性能, 增强直流微电网的惯性, 抑制网内功率扰动下的直流母线电压波动, 本文在传统虚拟惯性控制策略的基础上进行改进, 提出基于改进模型预测控制的并网变换器自适应虚拟惯性控制策略, 得到以下结论:

1) 电流内环采用模型预测控制和改进延时补偿算法, 实现对电流给定值的快速跟踪, 消除了传统电流内环 PI 控制器及 PWM 调节器, 与基于传统 PI 电流内环的控制策略相比, 控制系统的动态性能得到了提高;

2) 电压外环引入自适应 AVSG 控制, 根据系统所受扰动的不同设计了虚拟惯量参数自适应方程, 通过将 AVSG 中的惯性系数与电压变化率结合来实现惯性参数的灵活可调, 弥补了传统 AVSG 控制惯量参数恒定的不足;

3) 采用本文控制策略的 BGC 在直流微电网出现负荷功率波动时可以有效抑制直流母线电压波动, 在直流微电网出现极间短路故障时可以有效减缓母线电压下降速率, 降低故障电流峰值, 提高了直流母线电压的稳定性和系统在不平衡工况下的运行能力。

参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 杜晓东, 赵建利, 刘科研, 等. 基于数字孪生的光伏高比例配电网过载风险预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 136-144.
DU Xiaodong, ZHAO Jianli, LIU Keyan, et al. Digital twin early warning method study for overload risk of distribution network with a high proportion of photovoltaic access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 136-144.
- [3] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.
QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 47-57.
- [4] 李占凯, 李炬, 张福民, 等. 基于交流信号注入的混合微电网功率均衡策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 18-26, 34.
LI Zhankai, LI Ju, ZHANG Fumin, et al. Power balance control strategy of hybrid microgrid based on AC signal injection[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 18-26, 34.
- [5] WU T F, CHANG C H, LIN L C, et al. DC-bus voltage control with a three-phase bidirectional inverter for DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1890-1899.
- [6] 张继红, 赵锐, 高雷, 等. 直流微网母线电压稳定控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4922-4929.
ZHANG Jihong, ZHAO Rui, GAO Lei, et al. DC bus voltage stability control strategy for DC microgrid[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4922-4929.
- [7] KOTRA S, MISHRA M K. Design and stability analysis of DC microgrid with hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1603-1612.
- [8] 刘海涛, 熊雄, 徐旖旎, 等. 含恒功率负载的直流微网稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(5): 42-49.

- LIU Haitao, XIONG Xiong, XU Yini, et al. Stability analysis of DC microgrid with constant power load[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5): 42-49.
- [9] 卢艳杰, 刘永慧. 基于固定时间滑模的直流微电网系统电压控制[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 159-166, 236.
- LU Yanjie, LIU Yonghui. Voltage control of direct-current microgrid system based on fixed-time sliding mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 159-166, 236.
- [10] 孟飞, 曲骅, 郭添亨, 等. 直流微电网的惯性与阻尼自适应协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 149-157.
- MENG Fei, QU Hua, GUO Tianheng, et al. Adaptive coordinated control of inertia and damping for DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 149-157.
- [11] WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized with virtual synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 6005-6016.
- [12] 李峰, 秦文萍, 任春光, 等. 混合微电网交直流母线接口变换器虚拟同步电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3776-3788.
- LI Feng, QIN Wenping, REN Chunguang, et al. Virtual synchronous motor control strategy for interfacing converter in hybrid AC/DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3776-3788.
- [13] 朱晓荣, 孟凡奇. 含虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 208-218.
- ZHU Xiaorong, MENG Fanqi. Stability analysis of DC microgrid with virtual inertia control[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 208-218.
- [14] 刘彦呈, 吕旭, 张勤进, 等. 基于多滑模变结构的双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 121-130.
- LIU Yancheng, LÜ Xu, ZHANG Qinjin, et al. Virtual inertia control strategy of bidirectional grid-connected converter applying multiple sliding mode variable structure control[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 121-130.
- [15] 曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 等. 基于电流一致性的直流微电网自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 11-21.
- ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, et al. Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency[J]. Power System Protection and Control, 2022, 51(12): 11-21.
- [16] 伍文华, 陈燕东, 罗安, 等. 一种直流微电网双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 360-372.
- WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An, et al. A virtual inertia control strategy for bidirectional grid-connected converters in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 360-372.
- [17] 李广浩, 彭克, 张新慧, 等. 直流配电系统接口换流器虚拟同步发电机自适应惯性控制策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 135-141.
- LI Guanghao, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Adaptive inertia control strategy of virtual synchronous generator of DC power distribution system interface converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 135-141.
- [18] 杨继鑫, 王久和, 王勉, 等. 基于无源控制的光储直流微网虚拟惯性控制策略研究[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 576-584.
- YANG Jixin, WANG Jiuhe, WANG Mian, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC microgrid with photovoltaic and storage system based on passivity-based control[J]. Power Generation Technology, 2019, 42(5): 576-584.
- [19] 季宇, 苏剑, 丁保迪, 等. 直流微电网储能系统的无源-滑模复合控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 63-70.
- JI Yu, SU Jian, DING Baodi, et al. Research on passive based control combined SMC control of DC micro-grid energy storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 63-70.
- [20] 金楠, 窦智峰, 李琰琰, 等. 电压源并网变换器有限控制集预测电流控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 123-130.
- JIN Nan, DOU Zhifeng, LI Yanyan, et al. Finite control sets predictive current control of voltage source grid-connected converter[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 123-130.
- [21] 于明, 王毅, 李永刚. 基于预测方法的直流微网混合储能虚拟惯性控制[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1526-1532.
- YU Ming, WANG Yi, LI Yonggang. Virtual inertia control of hybrid energy storage in DC microgrid based on predictive method[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1526-1532.
- [22] 赵书强, 王慧, 田娜, 等. 基于模型预测控制的直流微电网虚拟惯性优化方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3264-3276.
- ZHAO Shuqiang, WANG Hui, TIAN Na, et al. Model predictive control based DC microgrid virtual inertia optimal method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3264-3276.
- [23] XIA Changliang, LIU Tao, SHI Tingna, et al. A simplified finite-control-set model-predictive control for power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 991-1002.

收稿日期: 2024-01-05; 修回日期: 2024-04-19

作者简介:

郑峰(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微电网运行与控制方面的研究。E-mail: zf_wuhu@163.com

(编辑 姜新丽)