

文章编号:1006-2467(2025)10-1442-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.581

提高海上风电场主动频率支撑能力的控制策略

李仪博¹, 周前², 朱丹丹², 姜亚峰¹, 吴秋伟³, 陈健¹

(1. 山东大学电气工程学院, 济南 250061; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211100;
3. 清华大学清华深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 在低频交流输电系统中, 海上风电场和陆上交流系统之间因频率解耦和信号传输延迟, 导致海上风电场无法及时响应陆上电网频率变化. 为此, 结合系统惯量分析, 提出一种提升海上风电场主动频率支撑能力的控制策略. 在频率信号传递方面, 基于模块化多电平矩阵变换器(M³C)低频侧构网V/f控制策略, 结合系统惯量设计附加频率下垂控制器, 建立M³C网侧与低频侧的频率耦合关系, 从而实现两侧频率信息的实时传递. 在频率支撑方面, 当系统发生扰动产生频率偏差时, 海上风电机组通过附加下垂控制可调整功率指令值, 进而为系统提供频率支撑. 最后, 在MATLAB/Simulink平台中, 通过负荷变化和三相交流短路故障的仿真, 验证了所提协同控制策略的有效性.

关键词: 低频交流输电系统; 频率耦合; 协同控制策略; 频率支撑

中图分类号: TM732

文献标志码: A

Control Strategy for Improving Active Frequency Support Capability of Offshore Wind Farm

LI Yibo¹, ZHOU Qian², ZHU Dandan², JIANG Yafeng¹, WU Qiuwei³, CHEN Jian¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.,
Nanjing 211100, China; 3. Tsinghua Shenzhen International Graduate School,
Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: In low frequency alternating current (AC) transmission systems, offshore wind farm is unable to respond to changes in onshore grid frequency in a timely manner due to frequency decoupling and signal transmission delays between the offshore wind power system and the onshore AC system. To address this issue, a control strategy is proposed to improve the active frequency support capability of offshore wind farms by combining the system inertia. In terms of frequency signaling, an additional frequency sag controller is designed based on the V/f control strategy of the low-frequency-side structure network of modular multilevel matrix converter (M³C), combining with the system inertia. The frequency coupling link between the M³C net side and the low-frequency side is established to realize the real-time transmission of frequency information between the two sides. In terms of frequency support, when the system is disturbed to generate frequency deviation, the offshore wind turbine can adjust the power command value

收稿日期: 2023-11-17 修回日期: 2024-02-03 录用日期: 2024-02-19

基金项目: 国家电网公司总部科技项(4000-202218073A-1-1-ZN)

作者简介: 李仪博(2000—), 硕士生, 从事海上低频风电研究.

通信作者: 朱丹丹, 高级工程师, 电话(Tel.): 025-68686694; E-mail: zdd_life@126.com.

through additional droop control, thereby providing frequency support for the system. Finally, the effectiveness of the proposed coordinated control strategy is verified in MATLAB/Simulink by the simulation of load change and three-phase AC short circuit fault.

Keywords: low frequency alternating current (LFAC) transmission system; frequency coupling; collaborative control strategy; frequency support

随着我国“碳中和、碳达峰”战略的提出,高效、清洁的风力发电技术将迎来更大发展.其中海上风电因其资源丰富、适合大规模开发等优点受到越来越多关注.目前,海上风电的送出方案主要采用高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)方式^[1],然而 HVDC 在实现远距离海上风电传输的同时,需要建设大容量的海上换流站以及高压直流断路器,大大增加了建造与维护的成本.在此背景下,基于模块化多电平矩阵变换器(modular multilevel matrix, M³C)的低频输电系统通过降低输电频率减少线路损耗,并且仅需建设岸上换流站,为海上风电的高效送出提供了一种颇具竞争力的方案^[2].

M³C 是一种新型级联 H 桥型交-交变换器^[3],可以实现高压大容量的能量传输和频率变换,并具有高度模块化、可扩展性以及可靠性等显著优势,已经成为海上风电低频交流(low frequency alternating current, LFAC)输电系统中极具发展前景的变换器方案^[4-5].当前 M³C 的研究集中在 M³C 输入与输出侧电流以及内部电容均压的控制策略上.文献^[6-7]中对 M³C 的数学模型进行双 $\alpha\beta$ 坐标变化,简化控制的复杂度,实现低频与工频侧的解耦.文献^[8-10]中进一步设计层次化的电容电压控制方法,实现桥臂能量的均衡分布.目前,在海上风电 LFAC 中,通过 M³C 已经可以实现海上风电高效、稳定的送出.

然而,海上风电场经过低频输电系统接入电网会对交流系统的频率稳定带来很大影响.一方面,风力发电机组取代旋转惯量大的同步发电机,将降低电网整体惯量;另一方面,海上风电场侧低频侧频率与电网频率解耦,无法为电网频率事件提供功率支撑.不断增加的风电机组容量将导致电力系统“有效惯量”不断减少,使电力系统成为一个“低惯量”系统.“低惯量”系统旋转动能较小,在负荷变化和系统故障下,会导致较大的频率偏移,严重影响电力系统稳定性.文献^[11]中分析了功角振荡对频率动态特征指标的影响,量化评估了不同频率动态指标与功角振荡指标的耦合强度.同样的问题也出现在海上风电经 HVDC 并网系统中.为了实现海上风电场对

电网频率变化的主动响应,文献^[12]中采用远端通信的方式将频率的变化信号传递到海上风电场,通过风电场的功率变化进行频率响应.文献^[13-14]中通过直流电容的电压值来传递电网频率的变化信息,进一步根据直流电压的变化来控制送端换流站的频率,最终实现风电场的主动频率支撑.然而,对本质还是交流电的低频输电系统而言,输电系统存在无功损耗问题,使得风电场中各风机端电压无法保证一致.因此,不能借鉴柔直输电系统中将电压作为频率变化信号载体的方法,需要重新设计协同控制策略.

为了使海上风电场及时响应陆上电网频率变化,本文结合系统惯量分析,提出一种提升海上风电场主动频率支撑能力的控制策略.该控制策略由两部分组成:首先,基于 M³C 低频侧构网的 V/f 控制方式,在考虑系统惯量的基础上设计附加频率下垂控制器,建立起 LFAC 中网侧频率与低频侧频率之间的线性关联,使得风电场可以通过低频侧频率来实时接收网侧频率信息;其次,在风场侧设计附加下垂控制环节,当风电场检测到频率的偏差信号时,调整风场出力进行频率支撑,从而增强系统的频率稳定性;相比现有远端通信策略,所提控制策略能够更快地将网侧频率信号传递至风电场,避免通信链路由于传输距离造成的信号延迟问题.最后,在 MATLAB/Simulink 平台中搭建仿真模型,对所提控制策略进行了仿真验证.

1 系统结构与控制策略

图 1 为海上风电场经低频输电系统并网的拓扑结构图.风电场发出低频的电能,通过海底电缆与陆

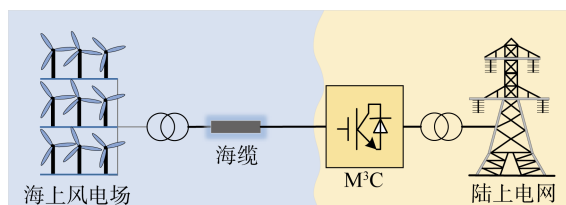


图 1 风电场经低频交流输电系统并网的拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of wind farm grid connected by low frequency AC transmission systems

上换流站 M^3C 连接, M^3C 将低频电能转化为工频后进行并网。

1.1 M^3C 数学模型及控制策略

图 2 为 M^3C 的主电路结构, 通过 9 条桥臂与两侧电网相连, 每条桥臂由 N 个全桥子模块和一个串级电感 L_0 组成。其中, $u_x, i_x (x = a, b, c)$ 分别为工频侧的相电压与相电流, 频率为 f_s ; $u_y, i_y (y = u, v, w)$ 分别为低频侧的相电压和相电流, 频率为 f_l 。

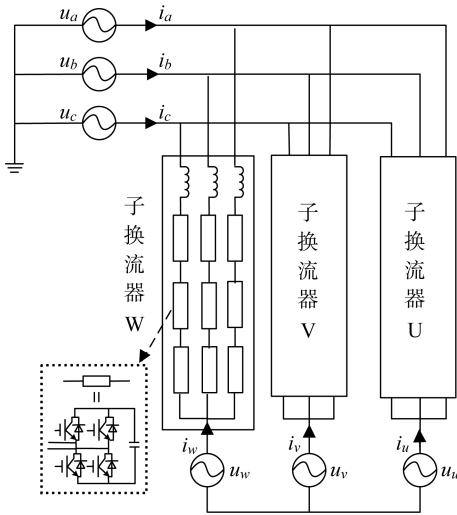


图 2 M^3C 主电路结构

Fig. 2 M^3C main circuit structure

由图 1 可得桥臂 xy 的电压方程为

$$u_x = Ri_{xy} + L \frac{di_{xy}}{dt} + u_{xy} + u_y \quad (1)$$

式中: i_{xy} 为 xy 桥臂的电流; u_{xy} 为 xy 桥臂的电压; R 为桥臂的等效电阻; L 为桥臂电感; t 为时间。

M^3C 拓扑结构复杂, 但经过双 $\alpha\beta 0$ 变换后可以实现工频侧和低频侧电气量的分离, 将两侧分别等效为电压源换流器进行控制。根据文献[15]中的推导, 可得 $\alpha\beta$ 坐标系下工频侧与低频侧的控制方程:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{L_0}{3} \frac{d}{dt} + \frac{R_0}{3} \right) \begin{bmatrix} i_{i\alpha} \\ i_{i\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sum\alpha} \\ u_{sum\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{i\alpha} \\ u_{i\beta} \end{bmatrix} \\ \left(\frac{L_0}{3} \frac{d}{dt} + \frac{R_0}{3} \right) \begin{bmatrix} i_{o\alpha} \\ i_{o\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{com\alpha} \\ u_{com\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{o\alpha} \\ u_{o\beta} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: R_0 为串级电感 L_0 的等效电阻; $i_{i\alpha}, i_{i\beta}$ 分别为工频侧相电流在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的分量; $i_{o\alpha}, i_{o\beta}$ 分别为低频侧相电流在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的分量; $u_{i\alpha}, u_{i\beta}$ 分别为工频侧相电压在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的分量; $u_{o\alpha}, u_{o\beta}$ 分别为低频侧相电压在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的分量; $u_{sum\alpha}, u_{sum\beta}$ 分别为工频侧共模电压在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的分量; $u_{com\alpha}, u_{com\beta}$ 分别为低频侧共模电压在

$\alpha\beta$ 静止坐标系下的分量。

为了方便进行控制器的设计, 将式(2)进行坐标变换, 将静止坐标系的下控制方程变换到 dq 坐标系中, 分别得到工频侧和低频侧 dq 坐标下的内环电流控制方程:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{id} \\ u_{iq} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \left(R_0 + L_0 \frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} i_{id} \\ i_{iq} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \omega_s L \begin{bmatrix} -i_{iq} \\ i_{id} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sumd} \\ u_{sumq} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \left(R_0 + L_0 \frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \omega_o L \begin{bmatrix} -i_{oq} \\ i_{od} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{comd} \\ u_{comq} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: u_{id}, u_{iq} 分别为工频侧相电压在 dq 旋转坐标系下的分量; u_{od}, u_{oq} 分别为低频侧相电压在 dq 旋转坐标系下的分量; i_{id}, i_{iq} 分别为工频侧相电流在 dq 旋转坐标系下的分量; i_{od}, i_{oq} 分别为低频侧相电流在 dq 旋转坐标系下的分量; u_{sumd}, u_{sumq} 分别为工频侧共模电压在 dq 旋转坐标系下的分量; u_{comd}, u_{comq} 分别为低频侧共模电压在 dq 旋转坐标系下的分量; ω_s, ω_o 分别为工频侧、低频侧电网角频率。

M^3C 的整体控制方式沿用经典的电压电流双闭环控制, 其中电流内环控制方案如式(3)所示, 外环控制器需要根据工频侧与低频侧的不同功能进行设计, 工频侧控制策略框图如图 3 所示。图中: u_{dc} 为工频侧直流电压; Q_s 为无功功率; ω_s 为工频角频率; * 表示相应变量的参考值; PI 表示比例积分控制器。系统正常运行时, M^3C 工频侧主要负责维持子模块电容电压的恒定以及和电网的无功交互, 其中电容电压值与工频侧 d 轴电流 i_{id} 有关, 无功功率与 q 轴电流 i_{iq} 有关。

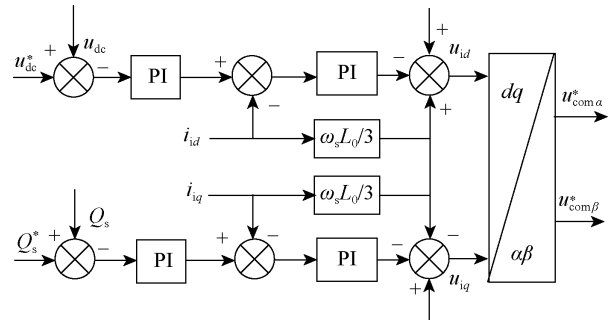


图 3 M^3C 工频侧的控制策略框图

Fig. 3 Control strategy block of M^3C power frequency side

M^3C 的低频侧为海上风电场建立同步电源进行能量的传输, 为此采用 MMC 中向无源网络供电

的 V/f 控制方案来控制低频侧电网的频率与电压幅值^[16]. 其中,低频侧频率为给定值,同步相位可以表示为

$$\theta = 2\pi f_{10}t \quad (4)$$

式中: f_{10} 为低频侧频率的给定值.

M^3C 低频侧端口的动态特性可以表示为

$$C \frac{du_{uvw}}{dt} = i_{uvw2} - i_{uvw} \quad (5)$$

式中: C 为 M^3C 低频侧端口的等效接地电容值; u_{uvw} 为 M^3C 低频侧输出等效电压; i_{uvw2} 为低频侧输入负载电流; i_{uvw} 为低频侧输入电流.

与电流内环设计相似,对式(5)进行坐标变换,在 dq 旋转坐标系中实现对低频侧电压幅值的控制,其中控制方程为

$$C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{id} \\ u_{iq} \end{bmatrix} + \omega_f C_f \begin{bmatrix} -u_{iq} \\ u_{id} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{id2} \\ i_{iq2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{id} \\ i_{iq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: C_f 为 M^3C 中的电容值; ω_f 为低频系统角频率; i_{id2} 、 i_{iq2} 分别为负载电流在 dq 坐标系下的 d 、 q 轴分量.

低频侧的整体控制方式如图 4 所示. 式中: i_{od2} 、 i_{oq2} 分别为低频侧负载电流在 dq 坐标系下的 dq 轴电流分量.

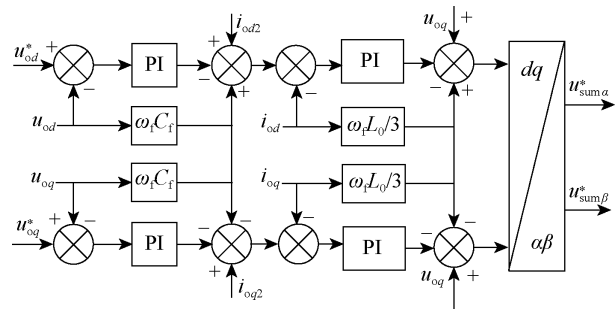


图 4 M^3C 低频侧的控制策略框图

Fig. 4 Control strategy block of M^3C low frequency side

综上所述,通过对工频侧和低频侧的解耦控制,可实现 M^3C 稳定运行,实现风电场能量有效送出.

1.2 海上风电场控制策略

低频风力发电系统多采用永磁直驱风机,永磁直驱同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)是全功率型风电机组,电机转速与风速有关,发电机发出的低频电能通过背靠背的全功率换流器与 M^3C 相连接. 机侧和网侧的换流器是控制的重点,机侧换流器的目的是控制电机的转速和定子电流,使有功和无功解耦,实现最大功率追踪;网侧换流器的目的是实现定交流侧无功功率和稳定直流侧电压.

网侧换流器的电流内环和电压外环控制如图 5

所示. 图中: I 为通过外环控制器得到的电流值,下标 d 、 q 表示 dq 轴分量; P_1 为机侧换流器在控制策略中的有功功率; Q_2 为网侧换流器在控制策略中的无功功率; PWM 表示脉宽调制. 外环电压控制系统控制直流电容电压稳定,将电压的参考值与实际值相比较生成误差信号,然后通过 PI 调节器来生成有功电流的参考值,来控制输出的有功功率. 内环电流控制将外环输出的电流参考值于实际值相比生成误差信号,用 PI 调节器对 d 、 q 轴的电流值进行调节,实现对功率因数的调节的功能. 在正常运行情况下,无功电流的给定值为 0,实现单位功率因数运行.

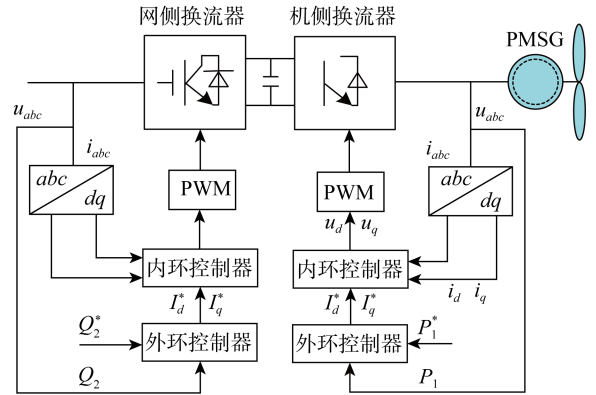


图 5 永磁直驱风机控制框图

Fig. 5 Control block of permanent magnet synchronous generator

2 系统的频率支撑

电力系统中能量实时平衡,当电力系统发生扰动后,通过控制发电功率来平衡负荷波动,为系统频率恢复提供支撑.

2.1 同步发电机的惯量响应及一次调频

对于运行的同步发电机,当扰动发生时,发电机的电磁功率发生突变,而原动机输入的机械功率保持不变,同步发电机在不平衡转矩下按照转子运动方程进行变化:

$$2H_G \omega d\omega/dt = \Delta P_{p.u.} \quad (7)$$

式中: H_G 为同步发电机的惯性时间常数; ω 为同步发电机的转子转速; ΔP 为扰动的大小,下标 p. u. 表示标么值.

同步发电机通过利用存储的转子动能,为系统提供功率支撑,这个过程就是惯量响应. 之后,同步机组在自发惯量响应的基础上,通过调速器反应系统频率的偏差,改变进汽或进水阀门的开度,从而调整同步机出力,实现有功频率的下垂-控制来进行一次调频^[17],整个过程如图 6 所示. 图中: f_n 为系统额

定频率; f_{\min} 为频率低点; f_s 为经过一次调频后的频率稳态值; f 为频率.

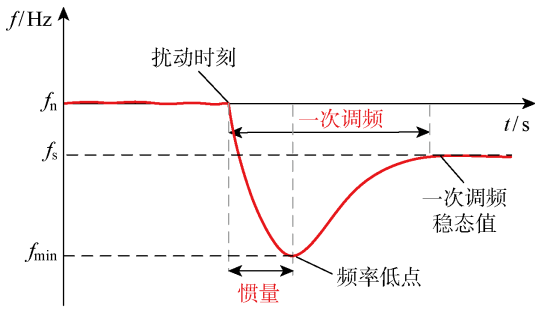


图 6 同步发电机惯量响应及一次调频示意图
Fig. 6 Synchronous generator inertia response and primary frequency modulation

2.2 风电场的一次调频

与同步发电机相比,风电场通常运行在 MPPT 的状态下,在频率变化时不会主动提供功率支撑.通过附加下垂控制环节,可以使风电场具备一次调频能力.下垂控制是使风电场模拟同步机组调频时的下垂特性来参与频率响应,其表达式为

$$-k_d \Delta f_F = \Delta P_F = H_{WF} d\omega/dt \quad (8)$$

式中: k_d 为风电场一次调频时的下垂系数; Δf_F 为风电场检测的频率偏差; ΔP_F 为风电场有功功率变化值; H_{WF} 为风电机组的虚拟惯性常数.

如图 7 所示,通过加入与频率相关的控制环节,能够改变风电场有功功率的指令值,从而调整风电场的出力^[18],进行频率支撑.图中: f^* 为风电场频率运行参考值; f^{mea} 为频率实际测量值; k_p 为比例控制系数; P 为风电场的实际输出有功功率.

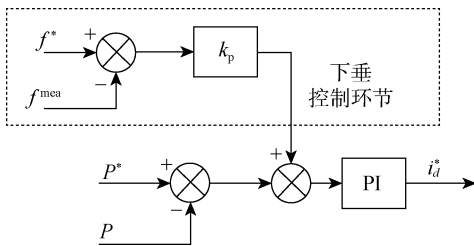


图 7 附加下垂控制环节
Fig. 7 Additional droop control

在电力系统分析中,广义上电力系统等效惯性时间常数 T_{total} 可以表示为

$$T_{total} = 2(W_G + W_{WF})/S_B^{[19]}$$

其中: W_G 为同步发电机转子旋转动能; W_{WF} 为风电机组旋转动能; S_B 为系统功率基准值. 因此,风电机组的虚拟惯性 H_{WF}^* 可表示为

$$H_{WF}^* = T_{WF} S_B / f_{WF}$$

的形式,其中 T_{WF} 为风电机组的虚拟惯性时间常数, f_{WF} 为风电场侧频率. 综上,令 T_J 为风机的等效惯性时间常数,结合系统惯量的定义式: $H^* = T_J S_B / f_N + H_{WF}^*$,可将系统惯量表示为

$$H^* = \frac{H_G P_{GN}}{f_N} + \frac{H_{WF} P_{WF}}{f_{WF}} \quad (9)$$

式中: H_G 、 H_{WF} 分别为同步发电机和风电场的等效惯性时间常数; P_{GN} 、 P_{WF} 分别为同步发电机和风电场额定有功功率; f_N 为电网额定频率.

3 用于频率支撑的协同控制策略

海上风电场经低频输电系统并网时,由于 M^3C 的“阻隔”,风电场侧的频率与电网频率解耦,风电场无法感知电网频率的变化. 低频侧属于 V/f 主动构网控制,需要通过自产锁相环实现低频电网相位的构建,自产锁相环的同步相位可由式(4)表示. 为使海上风电场能够进行频率支撑,需要将电网频率变化的信息传递至低频侧.

根据之前的分析, M^3C 可以直接控制低频侧的频率. 为了使风电场能够及时响应电网频率变化,结合系统惯量提出附加频率下垂控制方法,将电网侧频率与低频侧频率(f_1)进行耦合,建立线性联系,该控制策略的具体表达式为

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= k_c \Delta f + f_{10} \\ k_c &= \frac{f_{10} P_{WF}}{f_N P_{GN}} H^* \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: Δf 为电网频率的变化值; k_c 为比例系数.

根据式(4)和式(10)可以设计出如图 8 所示的频率下垂控制环节. 网侧频率的变化通过频率下垂控制映射到低频侧,风电场通过锁相环检测低频侧频率信息,从而调整风电场发出的有功功率提供频率支撑.

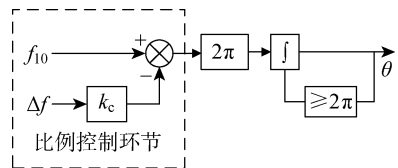


图 8 频率下垂控制环节
Fig. 8 Frequency droop control

综上所述, M^3C 频率控制环节与风电场附加下垂控制环节构成了如图 9 所示的海上风电场-LFAC 协同控制策略. 通过该协同控制策略,能够有效提高系统的频率稳定性.

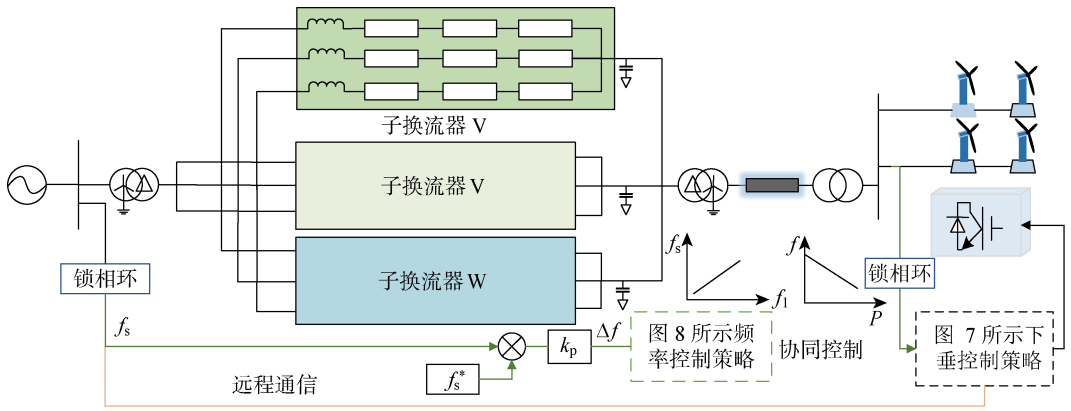


图 9 系统协同控制框图

Fig. 9 Cooperative control block of system

4 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 10 所示海上风电场经 LFAC 的并网模型, LFAC 的参数如表 1 所示. 通过 M³C 进行交交变换后把风电场能量传输至电网系统. 仿真中电网由同步电机和相关负载组成, 其中同步电机采用 7 阶模型, 参数如表 2 所示, 负载包括固定负载 $P_{L1} + Q_{L1}$ 、可变负载 $P_{L2} + Q_{L2}$. 负载所需的能量由同步电机和风电场共同提供.

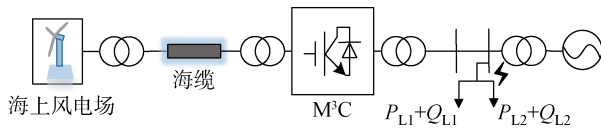


图 10 仿真模型结构图

Fig. 10 Structure of simulation model

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

装置	参数	数值
风电场	额定容量/MW	300
	子模块电容/mF	4
低频系统	额定线电压/kV	35
	额定频率/HZ	20
海缆	长度/km	28
M ³ C 换流站	额定容量/MW	400
	子模块电容/mF	4
	额定电容电压/kV	3
	桥臂模块数/个	100
	桥臂电感/mH	40
	阀额定电压/kV	12
工频系统	额定线电压/kV	35
	额定频率/HZ	50

表 2 同步电机参数

Tab. 2 Synchronous machine parameters

参数	数值
额定容量/MW	300
机端电压/kV	13.8
惯性时间常数/s	3.2
交轴电抗 x_d, x'_d, x''_d	1.305, 0.296, 0.252
直轴电抗 x_q, x'_q, x''_q	0.474, 0.243, 0.18
时间常数 $\tau'_d, \tau''_d, \tau'_q$	1.01, 0.053, 0.1
励磁调节器增益	300
励磁时间常数/ms	1
原动机调差参数	0.35
伺服时间常数/s	0.5

在仿真模型中设置两种场景检验所提控制策略的有效性. 两种场景分别为: 负荷 $P_{L2} + Q_{L2}$ 的突然接入; 系统 A₂ 处发生交流母线故障.

4.1 负荷突变

固定负载 P_{L1} 设置为 600 MW, 可变负载 P_{L2} 设置为 60 MW. 在第 4 s 时负荷 $P_{L2} + Q_{L2}$ 突然接入, 图 11 分别为采用无附加控制、远端通信以及所提协同控制 3 种情况下系统的响应曲线.

由图 11(a) 可知, 采用协同控制策略后的系统频率下降的速率和幅值较另外两种控制方式有明显降低, 这意味着所提控制策略可以为系统提供强有力的频率支撑作用, 从而增强系统的稳定性. 图 11(b) 为同步电机的有功出力曲线, 在频率发生改变时, 不采用附加控制策略只有同步机为系统提供有功功率支撑. 结合图 11(c)~11(e) 可知, 在所提控制策略下, 电网侧频率与低频侧频率存在耦合, 当扰动发生后低频侧频率会以 k_c 的比例与电网频率同步, 进而风电场增加出力与同步发电机共同分担负

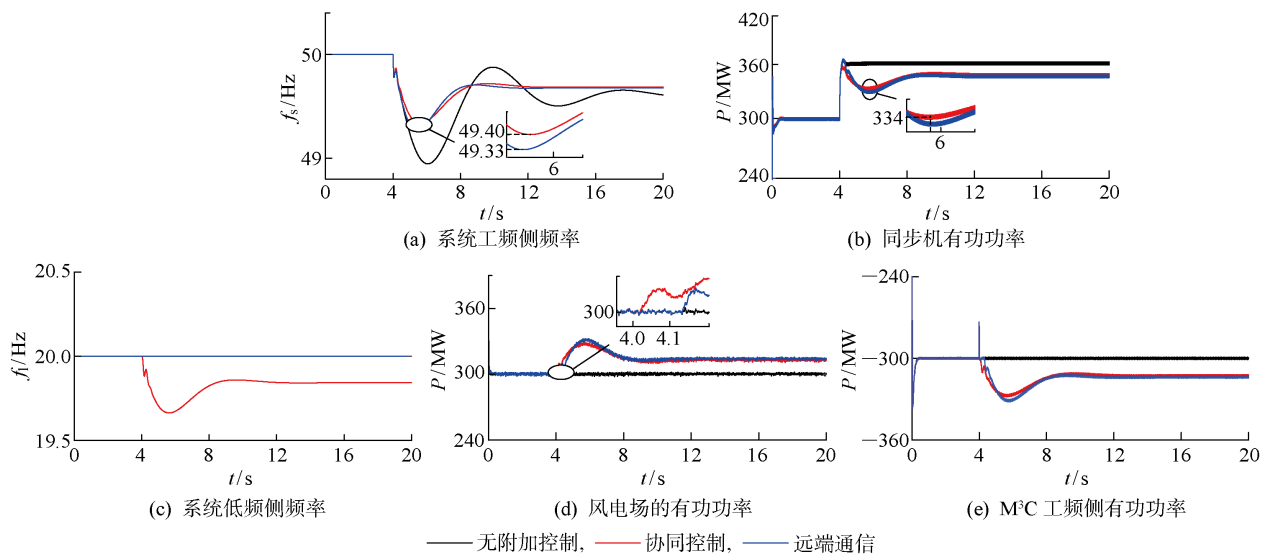


图 11 负载突增时系统响应曲线

Fig. 11 System response at sudden load increase of load

载突增所产生的能量缺额. 此外, 由于远端通信控制策略中存在不可避免的通信延迟问题, 这可能会影响控制系统的动态性能和可靠性, 所以采用所提控制策略改善了这一问题. 综上所述, 负载突增时, 采用所提控制策略和远端通信控制策略可使风电场提供部分有功出力, 因此同步发电机增加的有功出力较没有采用附加控制时更小, 相较于远程通信控制

策略, 所提控制策略下同步电机的响应速度更快, 更有利于增加系统稳定性.

4.2 三相交流短路故障

在 $t=4$ s 时, 图 10 中 A2 母线处发生三相交流接地故障, 持续时间 0.15 s, 负载设置为 60 MW 且保持不变.

图 12 为发生三相交流故障的系统响应曲线,

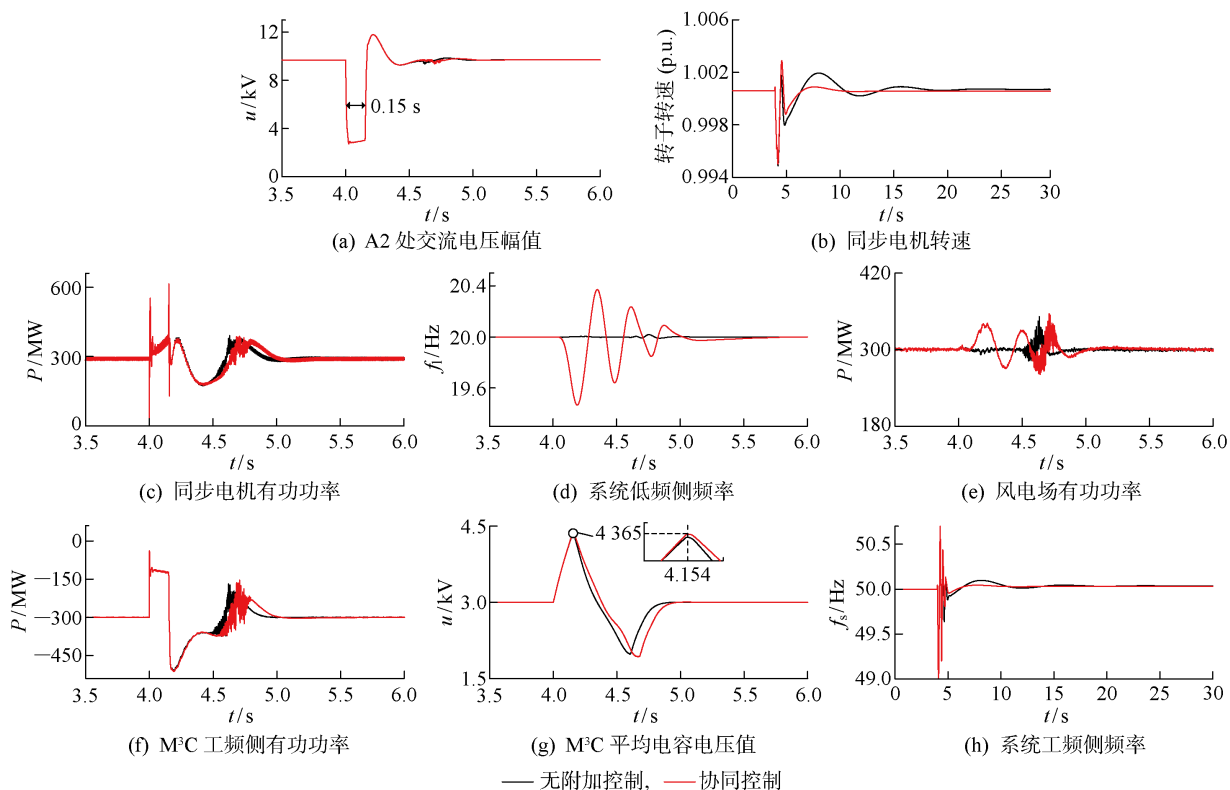


图 12 三相交流短路故障系统响应曲线图

Fig. 12 Response of three-phase AC short circuit fault system

A2 通过 $10\ \Omega$ 电抗接地. 由图 12(a) 可见, 故障发生时交流电压幅值迅速跌落到额定值的 27% 左右. 如图 12(b) 所示, 在故障发生时同步电机转子转速发生波动, 在所提控制策略下转子转速的波动幅度更小且恢复至稳定状态的用时更少. 图 12(c) 为同步电机的有功功率响应曲线, 当故障发生时, 由于系统存在明显的欠压以及电流饱和, 所以 4.4 s 之前有无附加控制策略下同步电机的有功功率曲线变化一致. 如图 12(d)、(e) 所示, 在所提控制策略下, 低频侧频率发生变化, 此时风电场根据频率变化做出响应. 结合图 12(c)~(g), 由于发生短路故障, 风电场发出的部分能量无法送出, 所以被 M^3C 中的电容吸收; 故障结束后, 电压恢复, 除风场的能量外, M^3C 也会把储存的能量进行释放, 可见在所提控制策略下 M^3C 中电容存储能量更多, 释放能量时间也更长. 由图 12(f) 可知在 4.5~4.7 s, 采用所提控制策略时风电场会进行频率响应, 超发了部分功率并储存在 M^3C 中; 故障解除后, 能量被释放出来分担了频率恢复过程中所需的有功出力. 在所提控制策略下, 故障后图 12(h) 中系统的频率波动也较原策略有很大的改善, 这对于增强系统的稳定性、减小系统崩溃的风险有重大意义.

5 结论

结合系统惯量提出 M^3C 低频侧的附加频率下垂控制, 通过控制环节建立起电网侧频率与低频侧频率之间的耦合联系, 从而使风电场能够通过锁相环直接检测到电网侧频率变化信号, 进而调整风电场自身有功出力为系统提供频率支撑. 所提控制策略相较于远端通信有如下优势:

(1) 通过建立起海上风电场与陆上交流电网频率之间的联系, 解决了信号传输过程中的延迟问题, 提高了系统可靠性.

(2) 在负荷突变情况下, 系统快速做出响应的同时也减缓了电网频率的波动, 增强了系统的动态性能.

(3) 发生三相交流短路故障时, 能够有效抑制同步电机转子振荡, M^3C 中的电容起到能量缓冲的作用, 在所提控制下, 系统更快地恢复至稳定运行状态, 提高了系统稳定性.

参考文献:

[1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.

TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(15): 3-14.

[2] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.

WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(31): 5459-5466.

[3] 李峰, 王广柱. 模块化多电平矩阵变换器电容电压纹波稳态分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 52-58.

LI Feng, WANG Guangzhu. Steady-state analysis of sub-modular capacitor voltage ripple in modular multilevel matrix converters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(24): 52-58.

[4] LIU S Q, ZHAO B Y, WANG G, et al. An improved phasor method for modelling and analysis of modular multilevel matrix converter [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(3): 1744-1755.

[5] OATES C. A methodology for developing 'Chain-link' converters [C] // **2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications**. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.

[6] KAMMERER F, KOLB J, BRAUN M. A novel cascaded vector control scheme for the modular multilevel matrix converter [C] // **IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Melbourne, Australia: IEEE, 2011: 1097-1102.

[7] KAMMERER F, KOLB J, BRAUN M. Fully decoupled current control and energy balancing of the modular multilevel matrix converter [C] // **2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference**. Novi Sad, Serbia: IEEE, 2012: LS2a. 3-1-LS2a. 3-8.

[8] 吴小丹. 面向低频海上风电送出的模块化多电平矩阵变换器输入输出侧解耦控制[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2909-2923.

WU Xiaodan. Input/output side decoupling control of modular multilevel matrix converter for low-frequency offshore wind power transmission [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 2909-2923.

[9] LIU S Q, WANG X F, MENG Y Q, et al. A decoupled control strategy of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(4): 2111-2121.

- [10] 孙玉巍, 常静恬, 付超, 等. 分频输电系统模块化多电平矩阵变换器谐波特性分析[J]. **电力工程技术**, 2022, 41(5): 21-30.
SUN Yuwei, CHANG Jingtian, FU Chao, *et al.* Harmonic characteristics analysis of modular multi-level matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. **Electric Power Engineering Technology**, 2022, 41(5): 21-30.
- [11] 马睿聪, 刘福锁, 曹永吉, 等. 电力系统频率动态与功角振荡的耦合特性分析[J]. **电力工程技术**, 2023, 42(4): 102-112.
MA Ruicong, LIU Fusuo, CAO Yongji, *et al.* Coupling characteristic analysis of power system frequency dynamic and power angle oscillation[J]. **Electric Power Engineering Technology**, 2023, 42(4): 102-112.
- [12] LIU H Z, CHEN Z. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2015, 30(3): 918-926.
- [13] 李宇骏, 杨勇, 李颖毅, 等. 提高电力系统惯性水平的风电场和 VSC-HVDC 协同控制策略[J]. **中国电机工程学报**, 2014, 34(34): 6021-6031.
LI Yujun, YANG Yong, LI Yingyi, *et al.* Coordinated control of wind farms and VSC-HVDC to improve inertia level of power system[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2014, 34(34): 6021-6031.
- [14] 江守其, 徐亚男, 李国庆, 等. 提升海上风电经柔直联网系统频率稳定性的协调控制策略[J]. **电力自动化设备**, 2023, 43(9): 194-201.
JIANG Shouqi, XU Yanan, LI Guoqing, *et al.* Coordinated control strategy for improving frequency stability of MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2023, 43(9): 194-201.
- [15] 徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之一: $M \sim 3C$ 的数学模型与等效电路[J]. **浙江电力**, 2021, 40(10): 13-21.
XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: Part 1-mathematical model and equivalent circuit of M^3C [J]. **Zhejiang Electric Power**, 2021, 40(10): 13-21.
- [16] 年珩, 金萧, 李光辉. 特高压直流换相失败对送端电网风机暂态无功特性的影响分析[J]. **中国电机工程学报**, 2020, 40(13): 4111-4122.
NIAN Heng, JIN Xiao, LI Guanghui. Influence of UHV DC commutation failure on the transient reactive power characteristics of wind turbines in sending terminal grid[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(13): 4111-4122.
- [17] 秦世耀. 风电机组惯量及一次调频优化控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
QIN Shiyao. Research on optimal control strategy of inertia and primary frequency regulation for wind turbines[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [18] 周涛, 黄菊, 韩汝帅, 等. 综合惯性控制下风机惯性支撑能力分析 & 等效惯量评估[J]. **上海交通大学学报**, 2024, 58(12): 1915-1924.
ZHOU Tao, HUANG Ju, HAN Rushuai, *et al.* Analysis of inertial support capacity and equivalent inertia evaluation of wind turbine under comprehensive inertial control[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2024, 58(12): 1915-1924.
- [19] AIK D L H. A general-order system frequency response model incorporating load shedding: Analytic modeling and applications[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006, 21(2): 709-717.

(本文编辑:王历历)