

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230594

全功率直驱风机电网友好型控制策略

朱益华^{1,2}, 罗超^{1,3}, 余佳微^{1,3}, 王奕宁⁴, 张浩博⁴, 向往⁴

(1. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510663; 2. 国家能源大电网技术研发(实验)中心, 广东 广州 510663; 3. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东 广州 510663; 4. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于构网型控制的电网友好型风电机组具有黑启动、电网支撑和弱电网运行等优势, 近年来逐渐被广泛研究。为探究不同电网友好型控制在不同场景下的运行性能, 以全功率直驱风机为研究对象, 总结归纳了4种典型的电网友好型风电机组控制策略。基于不同控制策略的架构和特点, 在PSCAD/EMTDC仿真平台上搭建了相应电网友好型风电机组模型。分别在黑启动、风速变化、功率减载、频率支撑、电压支撑、故障恢复以及故障限流7种工况下探究不同控制策略的运行性能。最后, 综合不同工况下的仿真结果, 得到了总体性能最优的控制策略。

关键词: 电网友好型风机; 构网型控制; 黑启动; 电网支撑; 故障穿越; 故障限流

Grid-friendly control strategy of full power rated direct drive wind turbines

ZHU Yihua^{1,2}, LUO Chao^{1,3}, YU Jiawei^{1,3}, WANG Yining⁴, ZHANG Haobo⁴, XIANG Wang⁴

(1. State Key Laboratory of HVDC, China Southern Power Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. National Energy Power Grid Technology R&D Center, Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Operation and Control for New Energy Power System, Guangzhou 510663, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Grid-friendly wind turbines based on grid forming control have been widely studied in recent years because of their advantages, such as black start, grid support and operational capability in a weak grid. To explore the operational performance of different grid-friendly control strategies in different scenarios, this paper takes a full power direct drive wind turbine as the research object and summarizes four typical grid-friendly control strategies. Based on the structures and characteristics of different control strategies, it builds the corresponding grid-friendly wind turbine models on PSCAD/EMTDC. Then, the operational performance of different control strategies is investigated in seven operating conditions, namely black start, wind speed change, load shedding, frequency support, voltage support, fault recovery and fault current limiting. Finally, the control strategy with optimal overall performance is obtained by synthesizing the simulation results in different conditions.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2400900).

Key words: grid-friendly wind turbine; grid forming control; black start; grid support; fault ride through; fault current limiting

0 引言

随着我国“碳达峰”、“碳中和”政策的提出,“十四五”期间,我国计划在沙漠、戈壁和荒漠地区建设大型风电光伏基地4.5亿kW^[1-2]。其中,截至2022

年9月底,全国风电已累计装机3.48亿kW,同比增加17%。以我国西北电网为例,由于风电装机容量、渗透率的不断增大,风力发电已成为仅次于火电的第二大电源。以火电为主的常规机组比例逐渐减小使得传统交流电网呈现低短路比、弱惯量特征,而风电机组作为新兴的主力电源亟需具备主动电网支撑能力^[3-5]。

传统的直驱风机采用跟网型控制,依赖锁相环

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2400900);
南方电网公司科技项目资助(SEPRI-K213030)

(phase locked loop, PLL)跟随交流电网电压的频率/相位角来实现与电网的同步,并通过控制馈入电网的交流电流来控制功率传输,表现为受控电流源特性。然而,传统的跟网型风电机组通常采用最大功率跟踪控制以实现风力资源的最大利用,不具有电网支撑能力,更没有预留一定的有功备用对系统进行频率支撑。因此,在风电高渗透率的电力系统中,较小的扰动也会引起较大的频率偏差,进而触发低频减载甚至导致电网崩溃^[6]。此外,PLL的控制参数不合理也会在弱电网下引发系统失稳,因此跟网型风电机组难以在弱电网下稳定运行^[7]。同时,由于跟网型风机控制的受控电流源特性,传统风机控制只能在交流电压稳定的情况下传输电能,从而不具备黑启动能力和无源网络下的自主运行能力^[8]。

针对跟网型风机控制存在的问题,近年来许多学者提出了基于构网型控制的电网友好型风机技术,使风机具备电网惯量/频率和电压支撑能力。同时,电网友好型风机控制不依赖PLL即可实现电网自主同步,可解决风机在弱电网下的稳定运行问题^[9]。此外,电网友好型风机可自主建立稳定的交流电压,具备黑启动和无源网络下的自主运行能力^[10-11]。文献[12]提出了转子侧换流器采用定直流电压控制、网侧换流器采用虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制的直驱风机构网控制架构。文献[13]则对网侧换流器采用匹配控制,使网侧换流器具备交、直流侧的构网能力,这种控制方式无须改动风机转子侧换流器控制,易于改造。工程上,苏格兰电力公司对容量为69 MW的Dersalloch风电场中的23台机组进行了构网型控制改造,并通过试验证明了采用构网型控制的电网友好型风机具有惯量支撑、孤岛运行和黑启动能力^[14]。

目前,已有诸多文献对不同电网友好型风机控制开展了性能对比,但均存在对比工况不全面的问题。文献[15]仅对比了转子侧换流器定直流电压时,网侧换流器采用VSG、功率同步控制(power synchronization control, PSC)等控制的黑启动性能。文献[16]也仅研究了虚拟同步机控制(virtual synchronous machine control, VSM)、下垂控制、PSC等,从理论上分析了这些控制的优缺点以及在远海风电场中实现黑启动的可能性。文献[17]虽然对不同的电网友好型控制架构进行了综述,但没有研究和对比不同控制在暂态和稳态工况下的运行性能。文献[18]通过仿真研究了不同电网友好型风机控制在黑启动、交流故障工况下的暂态性能,但故障期间未考虑故

障限流措施,不具备工程参考价值。总之,目前对电网友好型风机控制的综述研究大多只关注于控制架构和设计原理,且仅对比了少量工况下不同风机控制策略的运行性能。

为全面综合地评价不同电网友好型风机控制在不同工况下的运行性能,本文根据控制直驱风机直流链路电压的换流器不同,总结了现有文献里常见的4种典型的电网友好型风机控制架构,并针对不同的运行工况,仿真对比了风机采用4种典型控制时的运行性能。

1 电网友好型风机控制策略

直驱风机内部包含两个背靠背换流器,维持换流器之间直流链路电压的稳定是实现功率传输的前提。根据控制直流电压换流器的不同,可将目前常见的电网友好型风机控制策略分为网侧换流器控制直流电压和转子侧换流器控制直流电压两种。

1.1 网侧换流器直流电压控制

当网侧换流器控制直流电压时,转子侧换流器采用与跟网型风机控制相同的零 d 轴电流控制和最大功率跟踪策略。网侧换流器则采用匹配控制和电压多环控制结构。根据文献[19],可以选择 $v_{dc}-\omega$ 和 $v_{dc}^2-\omega$ 两种匹配控制结构,其中 v_{dc} 为直流电压实际值; ω 为风机输出角频率的实际值。由于 $v_{dc}^2-\omega$ 控制更有利于将换流器功率响应设置为过阻尼系统,进而可以克服功率振荡问题,故本文选取 $v_{dc}^2-\omega$ 控制作为网侧换流器的外环控制,并将网侧换流器直流电压控制称为RpGvfm。其中,R和G分别代表转子侧和网侧换流器;p代表采用功率控制;v代表采用直流电压控制;fm表示采用电网友好型控制。

由于电网友好型控制的交流电压控制回路存在电压单环和电压-电流多环控制结构。因此,根据电压控制回路结构不同,RpGvfm可分为网侧直流电压多环控制型(M-RpGvfm)和网侧直流电压单环控制型(S-RpGvfm)。

M-RpGvfm的结构如图1(a)所示,其中蓝色部分表示与传统跟网型风机控制之间的差异。 $v_{dc}^2-\omega$ 控制通过将直流链路作为能量缓冲器来模拟同步发电机的动态特性。

$$\omega = \omega^* + \left(\frac{s + k_T}{k_I s + k_D} \right) (v_{dc}^2 - v_{dc}^{*2}) \quad (1)$$

式中: ω^* 为风机输出角频率的参考值; s 为拉普拉斯变换中的复变量; k_T 为直流电压跟踪系数; k_I 为惯量系数; k_D 为阻尼系数; v_{dc}^* 为直流电压参考值。

S-RpGvfm的结构如图1(b)所示,其中调制信

号 u_{abc} 直接由瞬时相位角 θ 和电压幅值的参考值 E^* 经过调制波发生器产生。其中, 调制波发生器可由式(2)表示。

$$u_{abc} = E^* \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

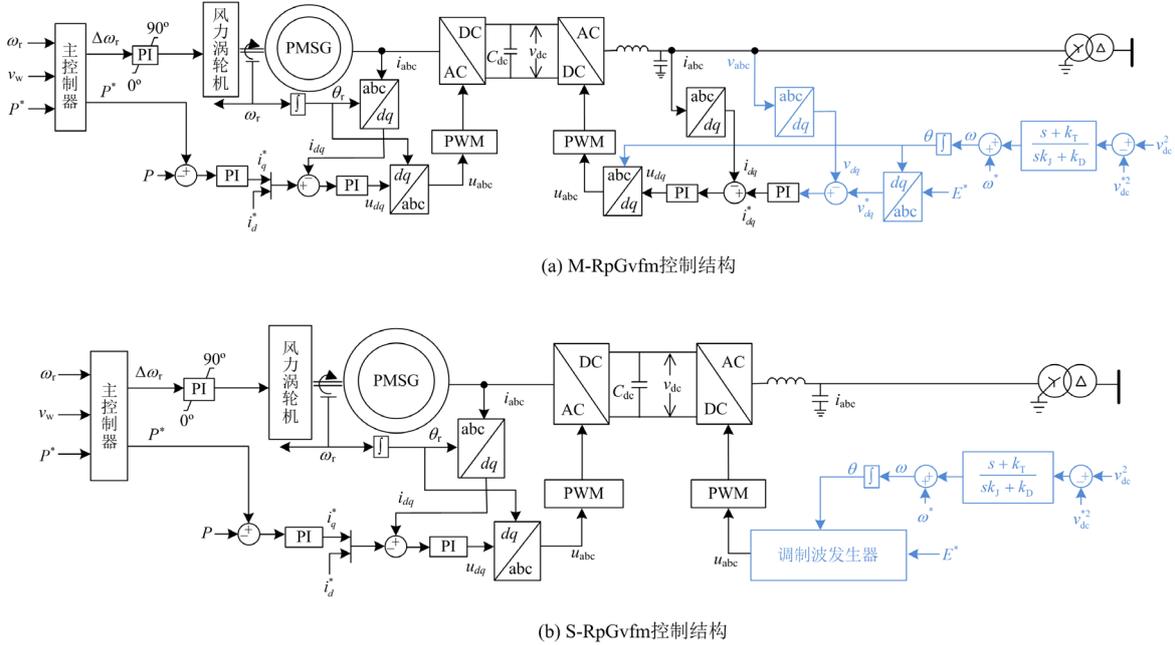


图 1 RpGvfm 控制结构示例

Fig. 1 Example of control structure of RpGvfm

1.2 转子侧换流器直流电压控制

转子侧换流器直流电压控制(简称为 RvGfm)由于转子侧换流器控制直流链路电压, 网侧换流器则可以采用文献[19]中给出的 6 种构网型换流器控制。考虑到控制的惯量支撑能力和控制复杂度, 本文采用 VSG 控制作为网侧换流器控制。RvGfm 控制亦可分为转子侧直流电压多环控制(M-RvGfm)和转子侧直流电压单环控制(S-RvGfm)结构, 如图 2 所示。其中, 转子侧换流器采用定直流电压控制策略。网侧换流器采用 VSG 控制, 来模拟同步发电机的惯量特性和一次频率调节特性, 通过调节角频率的参考值来调节风机的输出功率, 并产生瞬时相位角的参考值, 可表示为

$$\omega = \omega^* + \frac{1}{Js + D}(P^* - P) \quad (3)$$

式中: J 为惯量系数; D 为阻尼系数; P 为风机输出功率的实际值; P^* 为功率参考值, 通过最优转矩乘以转速来得到, 其实现过程由式(4)给出。

$$P^* = T_c^* \omega_r \quad (4)$$

式中: T_c^* 为风机产生的最优转矩; ω_r 为风机转速。

2 正常运行工况下控制性能对比

本节将对 4 种电网友好型风机控制策略在正常

运行工况(黑启动、风速变化和功率减载)下的控制性能进行比较。

2.1 风机模型及参数

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了 12 MW 全功率直驱风机模型, 风机参数参考了 GE 公司的直驱风机模型^[20], 用于对不同控制策略的控制性能进行评估。其中, 风机的参数如表 1 所示。

2.2 黑启动

对于风机从网侧进行黑启动的工况, 已经有诸多文献进行了研究, 本文针对从风机侧黑启动的工况对不同电网友好型风机控制策略的黑启动能力进行理论分析和仿真对比。

1) RpGvfm 控制

图 3 为 RpGvfm 采用的 $v_{dc}^2 - \omega$ 下垂控制作用下的风机直流电压和输出频率的运行点曲线。在网侧不带电的情况下采用 RpGvfm 进行黑启动, 当风机外部施加交流辅助电源时, 由于风机交流侧存在稳定频率点(假设频率为 ω_0), 系统可以稳定在 b 点, 输出直流电压 v_{dc0} 和交流频率 ω_0 。然而, 在撤掉外部电源后, 由于交直流侧均无电源, 直流电压和交流频率均不固定, $v_{dc}^2 - \omega$ 下垂控制没有稳态运行点, 运行点将会沿着由 b 到 a 的方向在曲线上持续移动, 直到直流电压下降到 0 为止。因此, RpGvfm 黑启

动在没有附加设备的情况下无法建立起稳定的直流电压和交流电压。

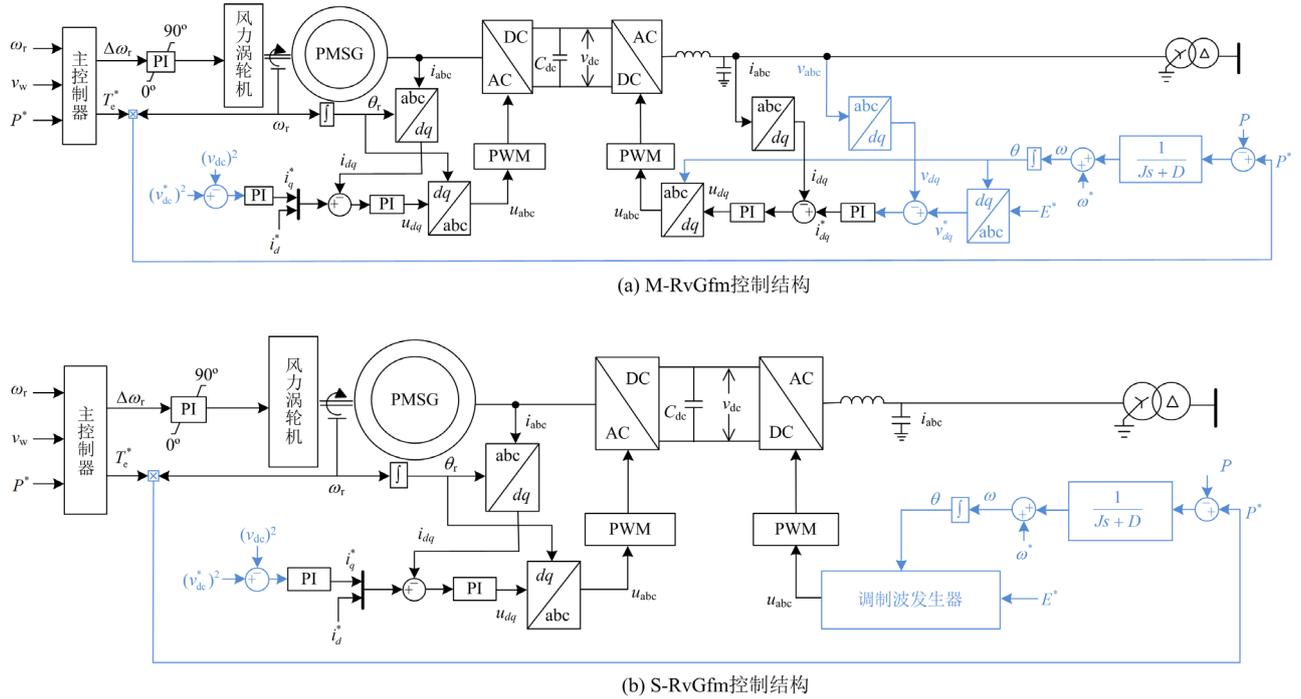


图 2 RvGfm 控制结构示例

Fig. 2 Example of control structure of RvGfm

表 1 风电机组参数

Table 1 Parameters of the wind turbine

参数	数值
额定容量/MVA	12
额定频率/Hz	20
额定风速/(m·s ⁻¹)	13.2
风轮半径/m	36
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.225
极对数	54
直流电压/kV	2
直流电容/mF	60
电压变比/kV(线电压)	66/0.69
额定容量/MVA	12
撬棒电阻/Ω	0.403
保护阈值/kV	2.2

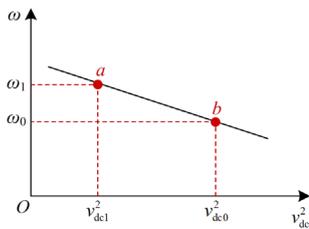


图 3 v_{dc}²-ω 下垂控制

Fig. 3 The v_{dc}²-ω droop control

2) RvGfm 控制

RvGfm 黑启动过程的示意图如图 4 所示。在该过程中，风轮转动带动 PMSG 建立定子侧交流电压后，启动转子侧换流器建立稳定的直流电压；之后，启动网侧换流器采用电网友好型控制建立交流电压；最后，闭合网侧断路器，建立主网交流电压实现黑启动与组网运行。因此，相较于 RpGvfm，RvGfm 控制可以在没有任何外部电源的情况下实现黑启动。

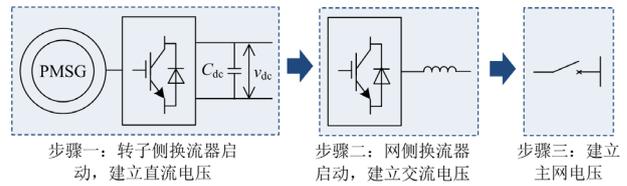


图 4 RvGfm 黑启动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of black start of RvGfm

图 5 给出了 RvGfm 黑启动的直流电压和交流电压仿真结果图。由图 5 可知，直流链路电压可在 0.01 s 内从 0 快速增加并稳定到 1.0 p.u.，网侧换流器也可以快速建立稳定的系统电压和频率。

对 RvGfm 黑启动后的负荷接入能力进行仿真测试。设置初始风速为 13.2 m/s，5 s 时闭合网侧断

路器, 风机对主网母线充电, 主网在 15 s 时接入风机容量 0.25 p.u. 的负荷, 20 s 时再接入 0.5 p.u. 的负荷, 图 6 给出了相应的仿真结果。由图 6(a)和图 6(b)可知, 15 s 时风机的输出功率变为 0.25 p.u., 直流电压受到负荷接入的影响产生轻微波动。20 s 时, 风机输出功率变为 0.75 p.u.。因此, RvGfm 下的风机可以在黑启动后稳定接入负荷并输出相应的有功功率。由图 6(c)和图 6(d)可知, 整个过程系统交流电压幅值和频率基本稳定, 维持在额定值附近。

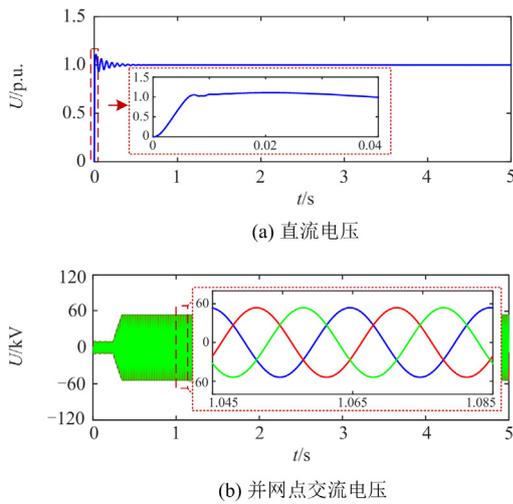


图 5 RvGfm 黑启动仿真结果
Fig. 5 Black start simulation results of RvGfm

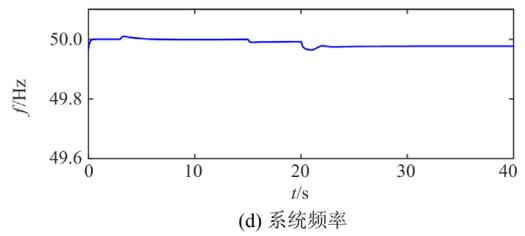
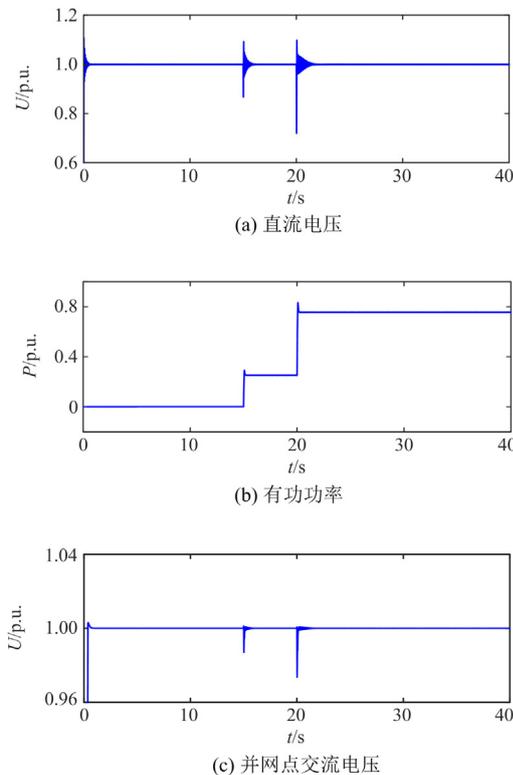


图 6 RvGfm 黑启动接入负荷仿真结果
Fig. 6 Black start simulation results of RvGfm when load increases

综上所述, 在风速正常运行范围内, 保持风速稳定, RvGfm 的黑启动过程较为平稳、无畸变, 可有效实现黑启动, 并可快速为所接入的局部动态负荷供电。

2.3 风速变化

为了测试对比 4 种电网友好型风机控制策略在不同电网强度下风速变化时的动态运行性能, 仿真设定风速在 20 s 时从 15 m/s 变为 10 m/s, 4 种控制在强电网工况下(短路比 SCR 为 8)的比较结果如图 7 所示。可见, 当风速变化时, 由于 RpGvfm 网侧换流器采用的匹配控制为有差控制, 因此风速变化时直流电压产生了轻微的波动。而 RvGfm 采用 PI 控制调节直流电压, 其直流电压基本保持稳定。此外, 多环控制和单环控制之间的动态性能没有显著差异, 4 种控制有功功率都能随着风速变化而变化, 功率响应性能相似。

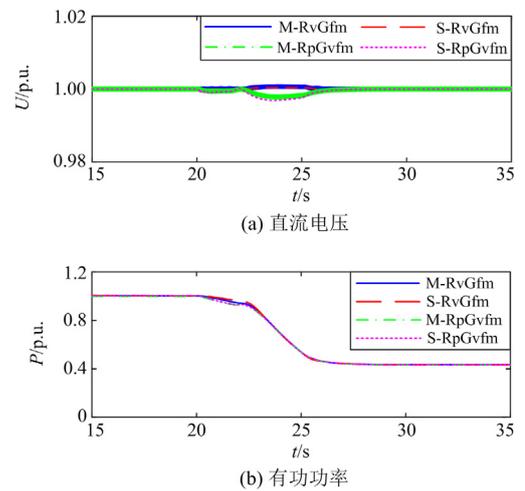


图 7 强电网下风速变化仿真结果
Fig. 7 Simulation results of wind speed change under strong grid

弱电网工况(短路比 SCR 为 1.5)下的风速变化仿真结果如图 8 所示。4 种控制的运行性能与强电网工况下的仿真结果基本相同。但考虑电压源相角特性, 弱电网下输出相同功率需要更大的相角差,

RvGfm 通过 VSG 控制调节相角差实现功率调节, 其响应时间更长; 而 RpGvfm 通过 PI 控制器调节功率, 其响应时间基本相同。因此, 在设计 RvGfm 类型的控制参数时, 应考虑电网强度, 以获得更好的性能。

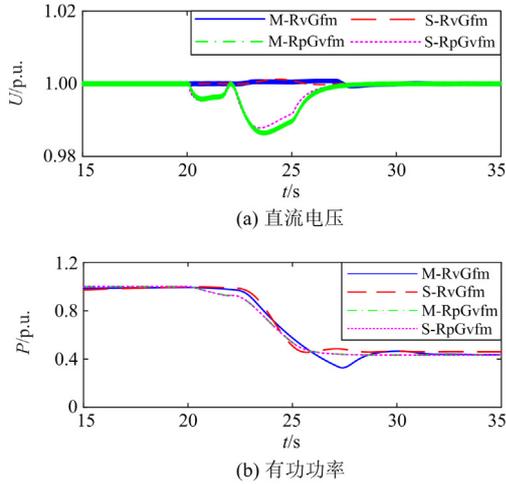


图 8 弱电网下风速变化仿真结果

Fig. 8 Simulation results of wind speed change under weak grid

2.4 功率减载

在 20 s 时将风机输出有功功率参考值由 1 p.u. 减小为 0.8 p.u., 对风机的功率减载性能进行评估。在该运行条件下, 转矩控制器将不断调节风机转子转速。

图 9 为 4 种控制策略在弱电网工况下的仿真结果比较。由图 9 可知, 在功率变化瞬间, 由于 RpGvfm 的风机网侧换流器采用有差的匹配控制, 其直流电压产生了明显的波动。而 RvGfm 由于采用 PI 控制调节直流电压, 其直流电压基本保持稳定。所以 RvGfm

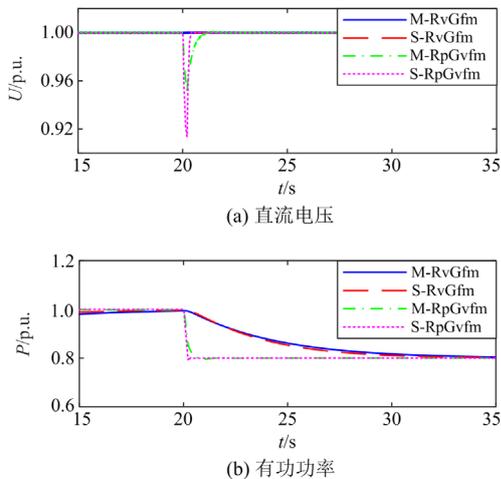


图 9 弱电网下功率减载仿真结果

Fig. 9 Simulation results of power curtail under weak grid

的直流电压跟踪性能较好。此外, RpGvfm 通过转矩 PI 控制器直接调节风机的输出功率, 而 RvGfm 通过网侧换流器的 VSG 控制调节输出功率。由于 VSG 控制存在惯性环节, 因此, RvGfm 的功率响应速度较慢。

3 主动支撑工况下控制性能对比

3.1 频率支撑

对于 RpGvfm 控制, 由于转子侧换流器采用定功率控制, 风机输出功率恒定, 因此不具有电网频率支撑能力。为使风机能够快速调节输出有功功率以响应电网频率扰动并提供频率支撑, 可在转子侧控制基础上引入 VSG 控制, 以此来模拟同步发电机的惯量和频率支撑特性。附加的 VSG 控制也可以用式(3)表示^[11]。

对于 RvGfm 控制, 由于网侧换流器已经采用 VSG 控制, 具有与发电机转子类似的转动惯量和阻尼特性, 可为电网提供频率支撑, 故无须再加入频率支撑环节。

RpGvfm 附加 VSG 控制环节后, 转子侧换流器的 VSG 控制结构如图 10 所示。为更好地对比 4 种控制采用相同的频率支撑环节时的运行性能, 其参数设置与 RvGfm 中 VSG 参数设置保持一致。

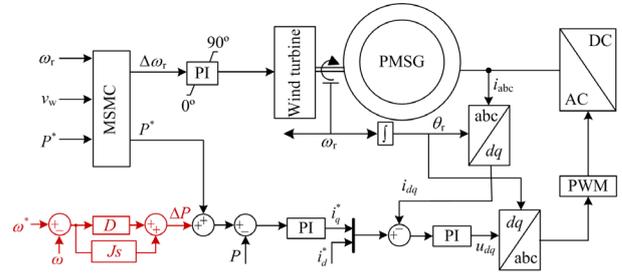


图 10 VSG 控制结构

Fig. 10 Control structure of VSG

为了对比 4 种电网友好型风机控制策略的频率支撑性能, 本文搭建了包含同步发电机、风机和负荷的三节点测试系统, 如图 11 所示。在该系统中进行了负荷扰动工况下的测试。其中, 同步发电机容量为 20 MW, 基本参数在表 2 中给出。t = 60 s 时, 分别在 4 种控制策略的风机出口处接入 0.2 MW 的负荷(1%负荷扰动)。对应的风机有功功率和交流系统频率分别如图 12 和图 13 所示。

由图 12(a)和图 13(a)可知, M-RvGfm 下的系统频率跌落到 49.9 Hz, 有功功率的恢复时间约为 10 s; 由图 12(b)和图 13(b)可知, S-RvGfm 下的系统频率跌落到 49.9 Hz, 有功功率恢复稳定的时间约为 30 s; 由图 12(c)和图 13(c)可知, M-RpGvfm 下的

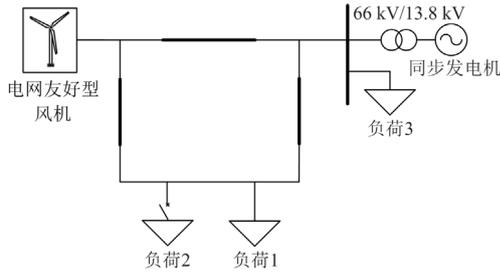


图 11 三节点测试系统

Fig. 11 Three-point test system

表 2 同步发电机基本参数

Table 2 Basic parameters of synchronous generator

元件	参数	数值
	下垂系数	20
调速器	速度继电器时间常数/s	0.1
	伺服电机时间常数/s	0.3
涡轮机	汽容时间常数/s	0.25
	再热器时间常数/s	10
励磁系统	励磁机调节增益	200
	励磁机时间常数/s	0.015

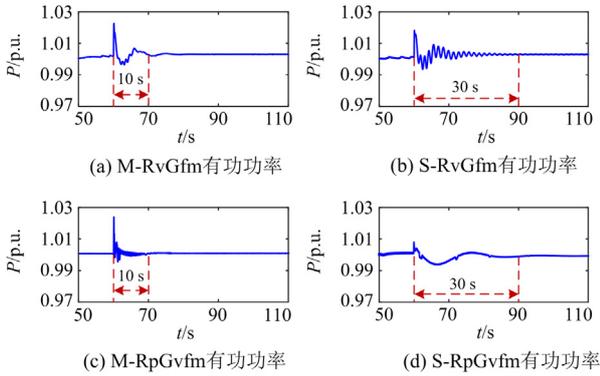


图 12 频率支撑下有功功率

Fig. 12 Active power under grid frequency support

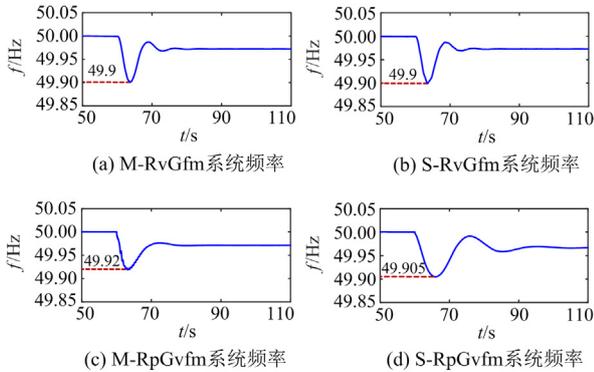


图 13 频率支撑下系统频率

Fig. 13 System frequency under grid frequency support

系统频率跌落到 49.92 Hz, 有功功率恢复稳定时间约为 10 s; 由图 12(d)和图 13(d)可知, S-RpGvm 下的系统频率跌落到 49.905 Hz, 有功功率恢复时间约为 30 s。

综上所述, 多环控制的有功功率恢复时间更短, RpGvm 的频率跌落程度更小。在负荷扰动下, 多环控制可以更稳定地控制交流电压, 从而快速稳定风机支撑功率, 而 RvGvm 在发生扰动期间释放了直流链路电容储存的能量, 在一定程度上减小了频率的跌落。

3.2 电压支撑

为使电网友好型风机具备类似于发电机的无功电压支撑能力, 本文引入无功-电压下垂控制, 以模拟同步发电机的 $Q-V$ 下垂特性, 即

$$V - V^* = K_q(Q - Q^*) \quad (5)$$

式中: V 为交流电压幅值; V^* 为交流电压幅值参考值; K_q 为下垂系数; Q 为风机输出的无功功率; Q^* 为风机输出的无功功率参考值。根据文献[21]可知, 无功电压下垂系数 K_q 的取值范围为 2~7, 考虑到在并网电压跌落到 0.5 p.u. 时, 风机输出满额无功功率, 故本文选取 $K_q = 2$ 。

利用 $Q-V$ 下垂环节, 可根据无功功率偏差来调节风机换流器交流电压控制参考值, 使电网友好型风机具有与同步发电机相似的调压能力。以多环控制为例, 其下垂控制结构如图 14 所示。

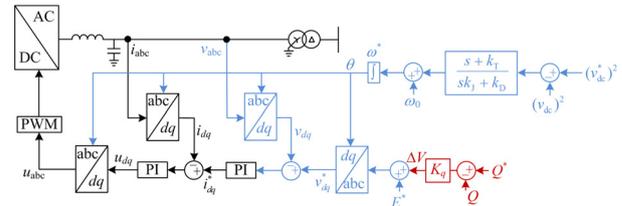


图 14 无功电压下垂控制结构

Fig. 14 Reactive power-voltage droop control

在 3.1 节搭建的三节点测试系统中, $t = 20$ s 时设置风机出口处发生非金属性三相接地短路故障, 并网电压跌落至 0.75 p.u. 左右, 故障持续时间为 0.4 s。故障期间, 不同控制策略下风机并网电压和无功功率分别如图 15 和图 16 所示。由图 15(a)和图 15(b)可知, RvGvm 的并网电压恢复时间约为 6 s; 由图 15(c)和图 15(d)可知, RpGvm 的并网电压恢复时间约为 2 s。同时, 由图 16 可知, 无论是网侧还是转子侧进行直流电压控制, 多环控制下的无功响应时间^[22]均比单环控制下的无功响应时间长。单环控制相较于多环控制无电流内环, 无功响

应速度更快。综上所述, RpGvfm 的并网点电压恢复时间更短, 单环控制比多环控制的无功响应速度更快。

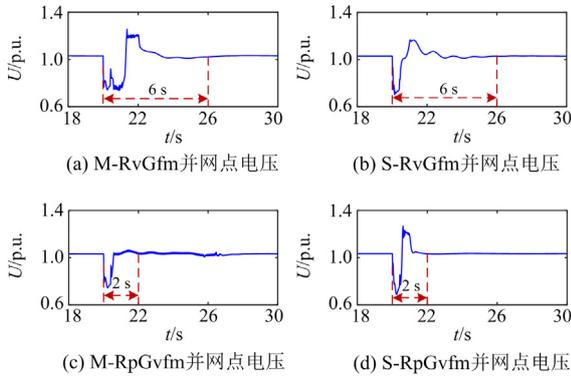


图 15 无功支撑下并网点电压

Fig. 15 Grid-connected point voltage under reactive power support

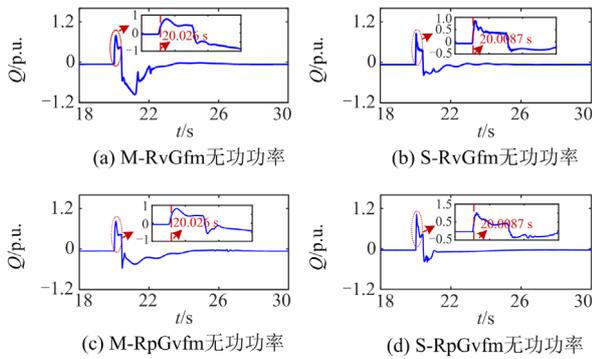


图 16 无功支撑下无功功率

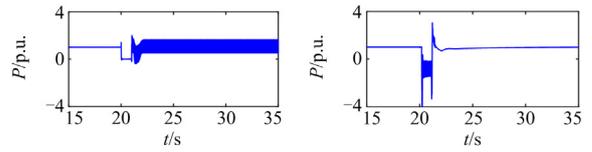
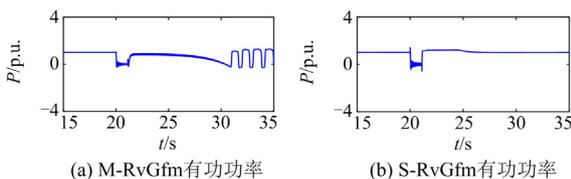
Fig. 16 Reactive power under reactive power support

4 交流故障工况下控制性能对比

4.1 故障恢复

为了对比 4 种电网友好型风机控制策略的故障恢复能力, 在不同的交流电网强度下, $t = 20 \text{ s}$ 时设置风机出口处发生金属性三相接地短路故障, 故障持续时间为 1.1 s 。采用 4 种电网友好型风机控制策略的仿真结果如图 17 和图 18 所示。

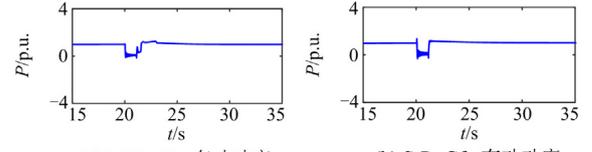
由图 17 可知, 在强电网条件下, 多环控制在清除故障后失去同步, 难以恢复到正常运行状态。而单环控制可始终与电网保持同步, 具有较好的暂态稳定性能。这是因为多环控制在故障后会出现电流饱和, 从而导致风机换流器输出电压与并网点电压



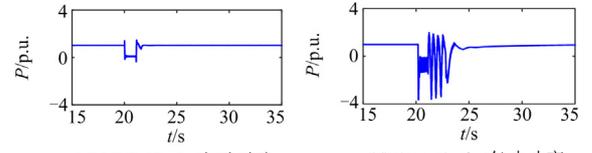
(c) M-RpGvfm有功功率 (d) S-RpGvfm有功功率

图 17 强电网下发生三相接地故障时有功功率

Fig. 17 Active power under three-phase to ground fault when integrated to strong grids



(a) M-RvGvfm有功功率 (b) S-RvGvfm有功功率



(c) M-RpGvfm有功功率 (d) S-RpGvfm有功功率

图 18 弱电网下发生三相接地故障时有功功率

Fig. 18 Active power under three-phase to ground fault when integrated to weak grids

之间的相位差逐渐增大, 稳定裕度降低^[19]。

比较图 17 和图 18 中的多环控制和单环控制性能, 在控制参数和故障持续时间保持不变时, 强电网下的多环控制失去稳定, 而弱网下的多环控制依然能够保持稳定, 这是因为在强电网下, 微小的相位变化就会引起明显的功率振荡, 导致多环控制稳定裕度降低, 所以多环控制在弱电网下的故障恢复能力比强电网下更好。

4.2 故障限流

本文采用功率限流策略来对 4 种电网友好型风机控制策略的限流效果进行比较。所采用的功率限流控制如图 19 所示, 为了实现对无功的主动调控, 将图 14 中的 $Q-V$ 下垂控制替换为采用无功 PI 控制并附加 $V-Q$ 下垂环的结构, 当检测到电网电压幅值低于额定值的 0.9 倍^[23]时, 功率限制环节启动, 由正常运行时的下垂控制产生功率参考值切换为给定功率参考值。

考虑到交流故障期间的无功电流注入需求和风机换流器输出电流限制, 设计不同电压跌落程度下的风机无功功率和有功功率的参考值分别为

$$Q^* = \begin{cases} \text{电压下垂控制} & V_{pu} > 0.9 \\ 2S_{new}(1 - V_{pu}) & 0.5 \leq V_{pu} \leq 0.9 \\ S_{new} & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

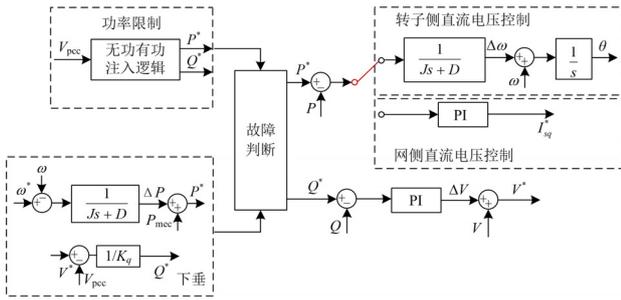


图 19 功率限流控制框图

Fig. 19 Power current limiting control diagram

$$P^* = \sqrt{S_{new}^2 - Q^{*2}} \quad (7)$$

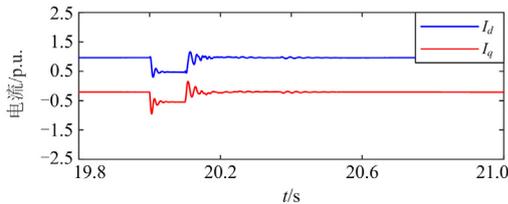
式中: V_{pu} 为电网电压幅值的标幺值; S_{new} 为电网故障时风机允许视在功率。其中

$$S_{new} = V_{pu} S_n \quad (8)$$

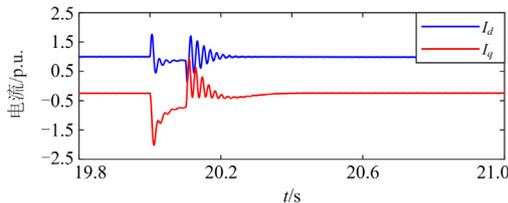
式中, S_n 为额定视在功率。由于 S_{new} 的存在, 在任何电压跌落程度下, 风机稳态输出电流都将不会大于 1.0 p.u.。同时, 功率限流控制采用无功功率优先注入原则, 在故障限流的同时优先为交流电网提供无功电压支撑。

在 $t = 20\text{ s}$ 时, 设置风机出口处发生非金属性三相接地短路故障, 持续时间为 0.1 s, 电压跌落至 0.7 p.u.左右, 图 20 为 4 种控制采用功率限流策略后的 d 轴和 q 轴电流。

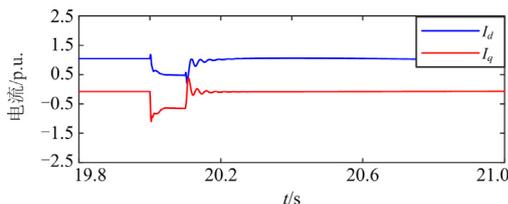
根据仿真结果可知, 采用前述设计的功率限流策略, 4 种控制均可有效限制故障期间的稳态电流。



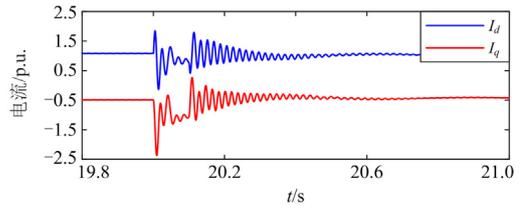
(a) M-RvGfm的d轴和q轴电流



(b) S-RvGfm的d轴和q轴电流



(c) M-RpGvfm的d轴和q轴电流



(d) S-RpGvfm的d轴和q轴电流

图 20 功率限流策略下 d 轴和 q 轴电流

Fig. 20 The d axis and q axis current under power current limiting strategy

其中, M-RvGfm、S-RvGfm、M-RpGvfm 和 S-RpGvfm 故障瞬间的电流最大峰值分别为 1.2 p.u.、2.3 p.u.、1.5 p.u.和 2.5 p.u.。分析可知, 单环控制由于缺少电流内环对故障电流进行限制, 在交流故障瞬间的过电流幅值远大于多环控制。

5 4 种电网友好型控制策略对比

5.1 正常运行工况性能对比

由第 2 节仿真结果可知, 采用 4 种控制策略均可维持风机在强电网(SCR 为 8)和弱电网(SCR 为 1.5)下的稳定运行, 且通过设计不同的启动策略, 都可以实现黑启动功能。

风速变化工况下, 由于 RpGvfm 采用有差的匹配控制调节直流电压, 而 RvGfm 采用无差的 PI 控制调节直流电压, RpGvfm 的直流电压波动比 RvGfm 更大, 但电网强度对 RvGfm 的功率响应速度有一定影响, 强电网下的功率响应速度比弱电网下更慢。

功率减载工况下, RvGfm 比 RpGvfm 的直流电压跟踪性能更好。但是由于 RpGvfm 通过转矩 PI 控制器直接调节风机的输出功率, 而 RvGfm 是通过网侧换流器的 VSG 控制调节输出功率, 所以 RpGvfm 的功率响应速度比 RvGfm 的功率响应速度更快。

5.2 主动支撑工况性能对比

由第 3 节仿真结果可知, 4 种控制策略都可以提供有功频率和无功电压支撑。在加入 VSG 环节后, 由于多环控制可以更稳定地控制交流电压, 可以快速稳定风机支撑功率, 因此多环控制的有功功率恢复时间更短, 而 RpGvfm 在发生扰动期间释放了直流链路电容储存的能量, 在一定程度上减小了频率的跌落, 因此频率跌落程度更小。在加入无功下垂控制以后, RpGvfm 比 RvGfm 并网点电压恢复时间更短。同时, 由于单环控制无电流内环, 相较于多环控制, 单环控制的无功响应速度更快。

5.3 交流故障工况性能对比

由第4节仿真结果可知,4种控制策略都具有一定的故障恢复能力,但在故障持续时间和控制参数保持不变的前提下,由于多环控制的电流内环在故障期间出现饱和,导致风机换流器输出电压与并网点电压之间的相位差逐渐增大,暂态稳定裕度降低,所以多环控制比单环控制的故障恢复能力要差。又由于在强电网下,微小的相位变化就会引起明显的功率振荡,导致多环控制稳定裕度降低,所以多环控制在弱电网下的故障恢复能力比强电网下更好。

在采取限流策略后,4种控制策略在故障期间的稳态电流都得到了有效抑制。但单环控制由于缺少电流内环对故障瞬间的电流幅值进行限制,所以单环控制在故障瞬间的过电流幅值比多环控制更大。

5.4 总体性能对比

根据上述不同工况下的仿真结果和性能对比分析,按照权重对每种工况下的运行能力进行评估,

交流故障穿越能力是风电机组维持故障期间并网运行和故障清除后稳定恢复的必要前提,其中故障限流能力又是确保故障期间风机换流器内部从众多电力电子元件安全运行的有力保障,因此风机故障穿越性能所占权重最高,为30%。而故障恢复能力则表征了故障清除后对电力系统的暂态扰动程度,设置权重为20%;风速变化和功率减载是正常运行情况下的常见工况,对电网稳定运行有一定程度的影响,因此权重都设置为15%;主动支撑是对已有电网控制结构的优化改善,不是必要的控制环节,因此权重最小,为10%。

其对比结果如表3所示。用“★”的数量来评价每种控制在不同工况下的运行性能,“★”的数量越多,则代表该控制在该工况下的运行性能越好,把每种工况下“★”的个数乘以权重再进行求和得到总评的“★”个数。由表3可知,M-RpGvfm的总评最高为2.35×★,因此M-RpGvfm的总体性能最好。

表3 4种控制策略性能对比

Table 3 Comparison of the presented four control strategies

	风速变化 (15%)	功率减载 (15%)	故障恢复 (20%)	频率支撑 (10%)	电压支撑 (10%)	故障限流 (30%)	总评
转子侧直流电压多环控制	★★★	★★	★	★★	★★	★★★	2.25×★
转子侧直流电压单环控制	★★★	★★	★★★	★	★★★	★	2.05×★
网侧直流电压多环控制	★★	★★★	★	★★★	★★	★★★	2.35×★
网侧直流电压单环控制	★★	★★★	★★	★	★★★	★	1.85×★

6 结语

本文对网侧换流器直流电压的多环和单环控制、转子侧换流器直流电压多环和单环控制这4种典型的电网友好型风机控制策略在黑启动、风速变化、功率减载、频率支撑、电压支撑、故障恢复以及故障限流7种工况下的运行性能进行了仿真对比分析。

在黑启动工况下,通过设计不同的启动策略,4种控制都能实现黑启动功能,但转子侧直流电压控制可在无外部电源且无控制切换的情况下直接黑启动并动态接入负荷。在风速变化工况下,转子侧直流电压控制的电压跟踪性能较好。在功率减载工况下,网侧直流电压控制的功率响应速度较快。在主动支撑工况下,加入频率支撑环节后,网侧直流电压控制的频率跌落较小;加入电压支撑环节后,单环控制的无功响应速度较快。在故障恢复工况下,单环控制的故障恢复能力较好。在故障限流工况下,多环控制的限流能力较好。对不同工况下4种控制策略的总体效果进行归一化比较,网侧直流电压多环控制的总体性能最好。

参考文献

- [1] 辛保安,陈梅,赵鹏,等.碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J].中国电机工程学报,2022,42(19):6919-6931.
XIN Baoan, CHEN Mei, ZHAO Peng, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6931.
- [2] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] 张思彤,梁纪峰,马燕峰,等.直驱风电场经柔性直流输电并网的宽频振荡特性分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):33-42.
ZHANG Sitong, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Broadband oscillation characteristics analysis of a VSC-HVDC connected direct drive wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 33-42.
- [4] 曹帅,刘东,赵成功.适用于风电经柔性直流并网系

- 统的柔性耗能装置及控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 51-62.
- CAO Shuai, LIU Dong, ZHAO Chenggong. A flexible energy dissipation device with control strategy for an HVDC wind power integration system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 51-62.
- [5] 盛四清, 俞可, 张文朝, 等. 大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 82-90.
- SHENG Siqing, YU Ke, ZHANG Wenzhao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 82-90.
- [6] 付红军, 陈惠粉, 赵华, 等. 高渗透率下风电的调频技术研究综述[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 104-115.
- FU Hongjun, CHEN Hui fen, ZHAO Hua, et al. Review on frequency regulation technology with high wind power penetration[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 104-115.
- [7] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [8] AVAZOV A, COLAS F, BEERTEN J, et al. Application of input shaping method to vibrations damping in a type-IV wind turbine interfaced with a grid-forming converter[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 210: 1-9.
- [9] YANG C R, HUANG L B, XIN H H, et al. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 36(4): 3563-3573.
- [10] ROSCOE A, KNUEPPEL T, SILVA R D, et al. Grid forming wind farm to system events, and the impact of external and internal damping[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(19): 3908-3917.
- [11] ROSCOE A, KNUEPPEL T, DA SILVA R, et al. Wind turbine with advanced controls used in grid-forming test by NREL and GE-power engineering[EB/OL]. Power Engineering: 1-7. <https://www.power-eng.com/renewables/wind-turbine-with-advancedcontrols-used-in-grid-forming-test-by-nrel-and-ge/# gref>, 2022.
- [12] YAZDI S S H, MILIMONFARED J, FATHI S H, et al. Analytical modeling and inertia estimation of VSG-controlled type 4 WTGs: power system frequency response investigation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 107: 446-461.
- [13] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报: 2023, 43(6): 2339-2358.
- ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358.
- [14] ROSCOE A, BROGAN P, ELLIOTT D, et al. Practical experience of operating a grid forming wind park and its response to system events[C] // Proceeding of the 18th Wind Integration Workshop, October 5-8, 2019, Dublin, Ireland: 16-18.
- [15] YU Y, CHAUDHARY S K, GOLESTAN S, et al. An overview of grid-forming control for wind turbine converters[C] // IECON 2021—47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 13-16, 2021, Toronto, ON, Canada: 1-6.
- [16] PAGNANI D, BLAABJERG F, BAK C L, et al. Offshore wind farm black start service integration: review and outlook of ongoing research[J]. Energies, 2020, 13(23): 1-24.
- [17] JAIN A, SAKAMURI J N, CUTULULIS N A. Grid-forming control strategies for black start by offshore wind power plants[J]. Wind Energy Science, 2020, 5(4): 1297-1313.
- [18] NGUYEN T T, VU T, PAUDYAL S, et al. Grid-forming inverter-based wind turbine generators: comprehensive review, comparative analysis, and recommendations[J]. arXiv preprint arXiv:2203.02105, 2022.
- [19] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [20] CLARK K, MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J. Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies[J]. GE Energy, 2010, 4: 885-895.
- [21] VERM N, KUMAR N, GUPT S, et al. Review of sub-synchronous interaction in wind integrated power systems: classification, challenges, and mitigation techniques[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 5(2): 277-302.
- [22] ERLICH I, NEUMANN T, SHEWAREGA F, et al. Wind turbine negative sequence current control and its effect on power system protection[C] // 2013 IEEE power & energy society general meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada: 1-5.
- [23] 王盼宝, 王鹏, 李珅光, 等. 电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3829-3837.
- WANG Panbao, WANG Peng, LI Shengguang, et al. Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]. High Voltage Engineering. 2022, 48(10): 3829-3837.

收稿日期: 2023-05-20; 修回日期: 2023-08-28

作者简介:

朱益华(1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统智能运行和稳定控制、新能源并网控制与仿真; E-mail: zhuyih@csg.cn

罗超(1987—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为新能源并网仿真与控制等。E-mail: ceelch@126.com

(编辑 周金梅)