

PMSG 风机直流电容虚拟惯性控制及惯性影响分析

曾雪洋, 李小鹏, 陈刚, 张华杰, 张纯

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:为解决风电在电力系统中渗透率不断增加而导致的电网惯量不断降低的问题,提出了永磁直驱风机参与电网频率调节的直流电容虚拟惯性控制。该虚拟电容控制能够耦合直流电压和交流频率,利用储存在直流电容中的静电能提供惯性支撑,并能有效地抑制频率变化的斜率和减小最大频率偏差,提高频率的动态特性。此外,详细研究了影响虚拟惯性时间常数的关键参数以及虚拟惯性时间常数与直流电容的确切关系,并给出了相关参数的选取方法。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真算例,仿真结果表明直流电容虚拟惯性控制能够准确模拟同步发电机的惯性响应,其控制性能优于传统转子虚拟惯性控制。

关键词:PMSG; 风力发电; 虚拟惯性; 直流电容; 频率支撑

中图分类号:TM 614 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)03-0009-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230302

DC-link Capacitor Virtual Inertia Control and Inertia Effect Analysis for PMSG-based Wind Turbine

ZENG Xueyang, LI Xiaopeng, CHEN Gang, ZHANG Huajie, ZHANG Chun

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the problem that power grid inertia is continuously reduced due to the increasing penetration of wind power in power system, a DC-link capacitor inertia control of permanent magnet synchronous generator (PMSG)-based wind turbine (WT) for participating in grid frequency regulation is proposed. With the virtual inertia control, the DC-link voltage and AC frequency are coupled to release the static electricity stored in DC-link capacitor to provide inertial support for power system during frequency disturbance. This virtual inertia control can effectively suppress the rate of change of frequency (ROCOF) and reduce the maximum deviation of frequency under frequency disturbance, and improve the dynamic characteristics of frequency. In addition, the key parameters affecting the virtual inertia time constant and the exact relationship between virtual inertia time constant and DC-link capacitor are discussed in details, and the selection method of the relevant parameters is given. Finally, a simulation study is built in PSCAD/EMTDC, and the simulation results show that the DC-link capacitor virtual inertia control can accurately simulate the inertia response of synchronous generator, whose control performance is better than that of the traditional rotor virtual inertia control.

Key words: PMSG; wind power generation; virtual inertia; DC-link capacitor; frequency support

0 引言

近年来,由于能源危机、气候变化与环境污染等问题,风能作为清洁能源发展迅速,在电力系统中的渗透率不断增加^[1-3]。与同步发电机不同,永磁直驱风机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)通过电力电子变流器接入电网,并且为了捕

获最大的风能,PMSG输出的功率通常由最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,这导致风机的转速与电网频率呈现出解耦状态,风机转子的旋转惯量被隐藏了^[3-5]。随着风电接入比例的不断增长,传统的同步发电机将会被风电机组部分替代,电力系统的惯量将会减少,这给电力系统的频率稳定与控制带来了严峻的挑战^[6]。

为了解决这个问题,国内外开展了大量研究工作,提出了许多利用风机自身调节能力来提供惯性

的措施,其中传统转子虚拟惯性控制最为常见^[7-8]。它利用转子旋转的动能提供虚拟惯性支撑,在由 MPPT 控制获得的参考功率上叠加一个与频率变化的斜率(the rate of change of frequency, ROCOF)成比例的附加功率,用以模拟同步发电机的惯性响应。但由于引入了 ROCOF,转子虚拟惯性控制会引入频率微分的测量噪声,可能导致风机不稳定运行^[5]。此外,由于转子虚拟惯性控制的附加功率与 MPPT 控制获得的参考功率相叠加,存在转子虚拟惯性与 MPPT 功率跟踪的交互影响^[9]:一方面会削弱虚拟惯性的控制效果;另一方面会影响频率的动态过程,在频率恢复阶段,转子要吸收部分功率用于转速恢复,这可能导致频率二次跌落。此外,在转子动能提供惯性的过程中,风机捕获的机械功率会随着转子转速的变化(无论转子转速上升还是下降)而减少。

为了避免上述利用转子动能提供虚拟惯性而存在的一些问题,一些研究人员在风机中增加储能设备来提供虚拟惯性,例如在风机变流器通过一个双向 DC/DC 变流器接入一个储能电池或者超级电容^[10-12]。但这会增加工程的造价以及增加控制策略的复杂性。实际上,风机变流器的直流电容中储备的静电能也可以用于提供虚拟惯性。文献[12-13]提出利用直流电容的能量来平滑风机输出的功率。文献[14-16]提出直流电压-频率下垂控制,在频率扰动期间,直流电压会临时改变,吸收或者释放直流电容的部分能量用于提供虚拟惯性支撑。与上述传统转子虚拟惯性控制相比,该控制避免了频率的微分,且不会影响风机的 MPPT 控制。然而,虽然上述研究成果表明储存在直流电容中的能量可以提供虚拟惯性支撑,但直流电压-频率下垂控制提供的虚拟惯性并不精确,并且没有研究如何确定下垂系数,也未深入研究虚拟惯性与直流电容、直流电压和最大允许直流电压偏差之间的确切关系,以及如何选取直流电容等虚拟惯性控制的参数。

为了解决上述问题,下面建立直流电压与交流频率的耦合关系,提出直流电容虚拟惯性控制,并详细研究影响虚拟惯性时间常数的关键参数以及虚拟惯性时间常数与直流电容的确切关系,并给出了相关参数的选取方法。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真算例,仿真结果表明直流电容虚拟惯性控制能够有效地抑制频率变化的斜率,减缓频率跌落的速度,其控制效果优于传统转子虚拟惯性控制。

1 PMSG 直驱风机模型和传统转子虚拟惯性控制

1.1 PMSG 直驱风机模型

典型的 PMSG 直驱风机的模型如图 1 所示。PMSG 风机通过一个背靠背变流器接入电网,其发出的有功功率可以由发电机侧变流器或者电网侧变流器控制。在所研究的模型中,发电机侧变流器控制风机发出的有功功率,电网侧变流器控制直流电压。风机模型详细介绍参考文献[17-18]。

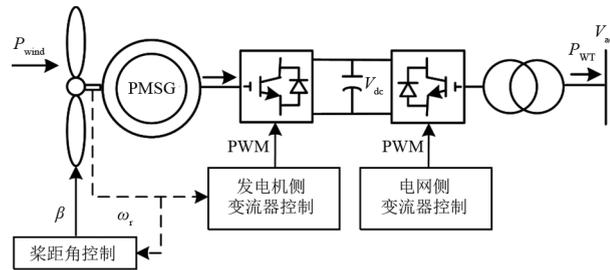


图 1 PMSG 直驱风机模型

根据空气学动力原理,风机捕获的功率 P_{wind} 为^[19]:

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风机叶片半径; v_w 为风速; λ 为叶尖速比; β 为桨距角; C_p 为风机的风能利用系数; ω_r 为风机转子转速。

正常运行条件下,当风机转速 ω_r 低于桨距角控制的参考值 ω_{max} 时,桨距角 β 为 0。此时 C_p 仅仅与 λ 有关,对于给定的 λ , C_p 将会取最大值 $C_{p\text{max}}$ 。当给定风速 v_w 后,风机将由式(2)确定最佳的转速 ω_r 。

将式(2)代入式(1)可得风机由 MPPT 控制获得的有功功率参考值 P_{MPPT} ^[20]。

$$P_{\text{MPPT}} = \frac{\pi \rho R^5 C_{p\text{max}}}{2\lambda^3} \omega_r^3 = k_{\text{opt}} \omega_r^3 \quad (3)$$

式中, k_{opt} 定义为 MPPT 曲线系数。

1.2 传统转子虚拟惯性控制

传统的转子虚拟惯性控制在风机定功率控制的参考功率中引入频率的导数^[8],从而让风机模拟同步发电机的惯性响应。风机加入虚拟惯性控制后,新的参考功率 P_{ref1} 为

$$P_{\text{ref1}} = P_{\text{opt}} + \Delta P_{\text{RVIC}} = P_{\text{opt}} - \frac{2H_{\text{RVIC}}}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} \quad (4)$$

式中: H_{RVIC} 为风机转子虚拟惯性时间常数; ΔP_{RVIC} 为传统转子虚拟惯性控制的附加功率; f_N 为电力系统的额定频率。

图2为传统转子虚拟惯性控制的控制框图,一阶惯性环节主要用于滤掉频率中的高频噪声。

传统的转子虚拟惯性控制是在由MPPT控制获得的参考功率上增加一个与频率的导数成比例的附加功率。

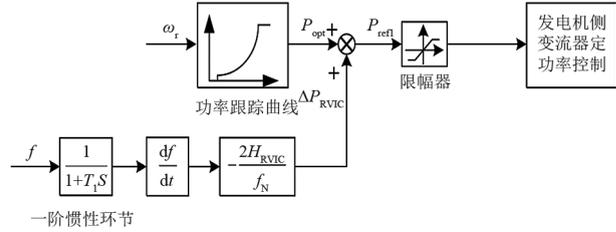


图2 风机传统转子虚拟惯性控制

2 直流电容虚拟惯性控制

直流电容静电能提供虚拟惯性,可以避免上述转子动能提供虚拟惯性的问题。但是正常运行时,直流电压通常由定直流电压控制而维持在一个恒定值,当交流系统的频率波动时,储存在直流电容中的能量不会响应交流系统频率的波动。为了解决这个问题,这里提出了一种利用存储在直流电容中的能量提供虚拟惯性的直流电容惯性控制。

对于交流系统,交流频率可以反映发电机出力与负荷的功率平衡关系。典型的同步发电机转子运动方程为

$$\frac{2H_g}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} = P_M - P_E = \Delta P_1 \quad (5)$$

式中: H_g 为同步发电机的惯性时间常数; f 为测量的交流频率; P_M 和 P_E 分别为同步发电机输入的机械功率和输出的电磁功率; ΔP_1 为当发电机转速变化时,同步发电机由于惯性响应而释放或者吸收的转子旋转功率。

对于背靠背变流器,直流电压可以像交流频率一样反映变流器输入与输出功率的平衡关系。忽略变流器的功率损耗,与式(5)类似的直流电容动态方程如式(6)所示。当直流电容的电压产生偏差时,直流电容将会充电或者放电,对变流器输出的有功功率进行补偿。

$$\frac{C_{dc} V_{dc}}{S_{WT}} \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{RS} - P_{CS} = \Delta P_2 \quad (6)$$

式中: C_{dc} 为变流器的直流电容值; V_{dc} 为直流电压; S_{WT} 为风机变流器的额定容量; P_{RS} 为输入直流电容的有功功率; P_{CS} 为直流电容输出的有功功率; ΔP_2 为直流电压变化时直流电容存储或释放的静电功率。

令 $\Delta P_1 = \Delta P_2$,建立交流频率与直流电压的耦合关系^[21]。

$$\frac{2H_{dc}}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} = \frac{C_{dc} V_{dc}}{S_{WT}} \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (7)$$

式中, H_{dc} 为直流电容提供的虚拟惯性时间常数。

同时对式(7)两边求积分可得:

$$\int_{f_0}^{f_1} \frac{2H_{dc}}{f_0} df = \int_{V_{dc0}}^{V_{dc1}} \frac{C_{dc} V_{dc}}{S_{WT}} dV_{dc} \quad (8)$$

$$\frac{2H_{dc}}{f_0} (f_1 - f_0) = \frac{C_{dc}}{2S_{WT}} (V_{dc1}^2 - V_{dc0}^2) \quad (9)$$

$$\frac{2H_{dc}}{f_N} \Delta f = \frac{C_{dc}}{2S_{WT}} [(V_{dc0} + \Delta V_{dc})^2 - V_{dc0}^2] \quad (10)$$

式中: f_0 、 V_{dc0} 分别为功率扰动前的交流频率和直流电压; f_1 、 V_{dc1} 分别为扰动后的交流频率和直流电压; Δf 为频率偏差, $\Delta f = f_1 - f_0$; ΔV_{dc} 为直流电压偏差, $\Delta V_{dc} = V_{dc1} - V_{dc0}$ 。

由式(10)可以推导出直流电容虚拟惯性控制的虚拟惯性时间常数 H_{dc} 和定直流电压控制新的参考值 V_{dc}^* 。图3为直流电容虚拟惯性控制框图。

$$H_{dc} = \frac{C_{dc} f_N V_{dc0}^2}{4S_{WT} \Delta f_V} \left[\left(\frac{\Delta V_{max}}{V_{dc0}} + 1 \right)^2 - 1 \right] \quad (11)$$

$$V_{dc}^* = \sqrt{\frac{4H_{dc} S_{WT} (f - f_0)}{f_N C_{dc}} + V_{dc0}^2} \quad (12)$$

式中: ΔV_{max} 为直流电压最大允许的偏差值; Δf_V 为直流电压达到限幅值时对应的频率偏差,定义为直流电容虚拟惯性控制所能覆盖的频率偏差范围。这里,将 Δf_{max} 取交流频率最大允许的偏差值,表示在最大允许的频率偏差内,直流电容虚拟惯性都能起作用。

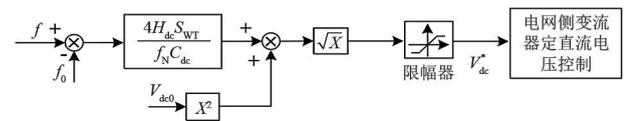


图3 直流电容虚拟惯性控制

3 直流电容虚拟惯性控制参数分析

3.1 虚拟惯性时间常数的影响因素

由式(11)可知虚拟惯性时间常数 H_{dc} 由直流电

容 C_{dc} 、直流电压额定值 V_{dc0} 、直流电压最大允许偏差值 ΔV_{max} 和直流电容虚拟惯性控制所能覆盖的频率偏差范围 Δf_v 决定。

风机采用表 1 中的参数, $\Delta V_{max} = 0.1$ pu, 虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 Δf_v 的关系如图 4 所示。

表 1 PMSG 风机主要参数

参数	参数值	参数	参数值
额定容量 S_{WT}/MW	2	直流电容 C_{dc}/mF	50
机端电压 V_{WT}/kV	0.69	正常运行	
额定频率 f_N/Hz	50	直流电压 V_{dc0}/kV	2
惯性时间常数 H_s/s	4	叶片半径 R/m	42
额定转速/(pu)	1.23	阻尼系数	0.01
额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	11	切入风速/($m \cdot s^{-1}$)	4
		极限风速/($m \cdot s^{-1}$)	25

从图 4 可知随着 Δf_v 的增大, H_{dc} 呈现出加速下降的趋势, 特别是 Δf_v 较小时, 这种趋势尤为明显。这表明着 Δf_v 越小, 直流电容提供的虚拟惯性时间常数越大。然而当风机参数确定后, 可利用的直流电容能也就确定了。 Δf_v 越小, 直流电压随频率变化的趋势越快, 当交流频率超过 Δf_v 时, 直流电压将会达到限幅值, 意味着直流电容虚拟惯性控制失去了控制作用。这里, 将 Δf_v 取交流频率最大允许的偏差值, 表示在最大允许的频率偏差内, 直流电容虚拟惯性控制都能起作用。而最大允许的频率偏差值是由电力系统中的发电机、负荷、输电网络等设备决定的。GB/T 15945—2008《电能质量 电力系统频率允许偏差》规定: 电力系统正常频率偏差允许值为 0.2~0.5 Hz。而暂态过程中允许的最大频率偏差是由不触发低频减载和高频切机决定, 通常取 1 Hz。因此, 取 $\Delta f_v = 1$ Hz。

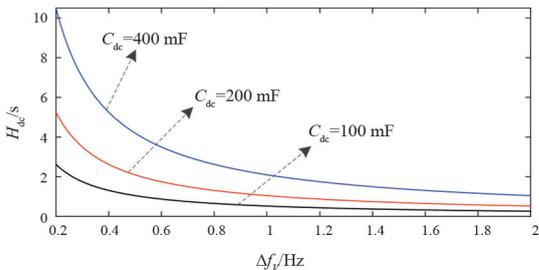


图 4 虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 Δf_v 的关系

图 5 为虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 V_{dc0} 、 ΔV_{max} 和 C_{dc} 的关系图。图 5 表明, H_{dc} 随着 C_{dc} 、 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 的增大而增大, 故可以通过调整这 3 个参数来增大直流电容提供的虚拟惯性。但需要注意增大 C_{dc} 、 V_{dc0} 会增大变频器的成本和体积, 增大 ΔV_{max} 可能带来绝

缘和 PWM 调制等问题。

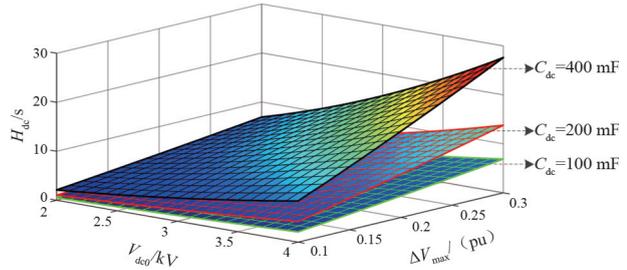


图 5 虚拟惯性时间常数 H_{dc} 与 V_{dc0} 、 ΔV_{max} 和 C_{dc} 的关系

3.2 直流电容的选取

直流电容的容量需要满足频率调节的需求。如果容量太小, 不能满足调频的需求; 如果容量太大, 会增加设备的造价, 造成一定容量的浪费。

正常直流电压运行下, 直流电容用于频率调节可储存的能量 ΔE_s 为

$$\Delta E_s = E_{max} - E_0 = \frac{1}{2}C(V_{dcmax}^2 - V_{dc0}^2) \quad (13)$$

式中: E_{max} 为在最大允许直流电压 V_{dcmax} 下直流电容储存的能量; E_0 为正常运行电压 V_{dc0} 下直流电容储存的能量。

与此同时, 正常运行电压下, 直流电容用于调频可释放的能量 ΔE_r 为

$$\Delta E_r = E_0 - E_{min} = \frac{1}{2}C(V_{dc0}^2 - V_{dcmin}^2) \quad (14)$$

式中, E_{min} 为最小允许直流电压 V_{dcmin} 下储存的能量。

假设直流电容充放电过程中, 电容值保持不变, 正常情况下直流运行电压 V_{dc0} 为:

$$\Delta E_s = \Delta E_r \quad (15)$$

$$\frac{1}{2}C(V_{dcmax}^2 - V_{dc0}^2) = \frac{1}{2}C(V_{dc0}^2 - V_{dcmin}^2) \quad (16)$$

$$V_{dc0} = \sqrt{\frac{V_{dcmax}^2 + V_{dcmin}^2}{2}} \quad (17)$$

假设风机的直流电压和允许的直流电压偏差量给定, 由式 (11) 可以得到直流电容与风机提供虚拟惯性的定量关系式为

$$C_{dc} = \frac{4H_{dc}S_{WT}\Delta f_v}{f_N V_{dc0}^2 [(\Delta V_{max}/V_{dc0} + 1)^2 - 1]} \quad (18)$$

图 6 为 C_{dc} 与 H_{dc} 、 V_{dc0} 、 ΔV_{max} 的关系图。从图 6 可以看出, 当需要风机提供的虚拟惯性时间常数 H_{dc} 确定后, 增大 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 都可以减小 C_{dc} , 而且呈现加速减小的趋势。故在设计直流电容虚拟惯性控制的参数时, 在保证绝缘和不出现 PWM 调制等稳

定性问题的前提下,可以适当增加 V_{dc0} 和 ΔV_{max} , 这样风机在提供相同 H_{dc} 时所需的 C_{dc} 更小。

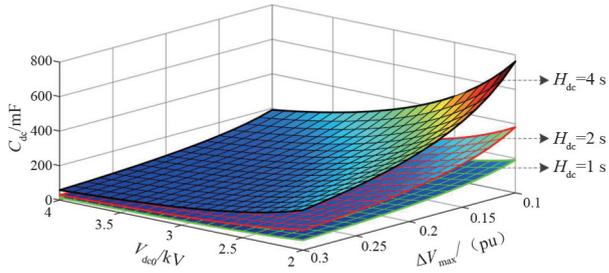


图 6 直流电容 C_{dc} 与 H_{dc} 、 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 的关系

4 仿真分析

4.1 仿真模型

为验证所提控制策略的准确性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 7 所示的仿真系统,包含一个 PMSG 风机、一个同步发电机、一个固定负荷和一个可投切负荷。PMSG 风机的参数见表 1。同步发电机采用 7 阶模型,相关参数见表 2。固定负荷 PL1 为 3 MW+0.3 Mvar,可变负荷为 PL2 为 0.15 MW + 0.015 Mvar。风速为 10 m/s,为了制造频率扰动,10 s 时刻投入可变负荷 PL2。

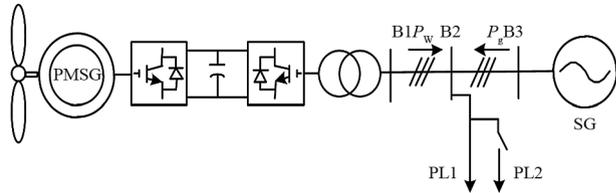


图 7 仿真测试系统

表 2 同步发电机主要参数

参数	参数值	参数	参数值
额定容量 S_g /MW	3	原动机时间常数/s	2.67
机端电压 V_g /kV	6.6	伺服电机时间常数	0.07
惯性时间常数 H_g /s	3.2	励磁调节器增益	400
原动机调差系数	0.04	励磁时间常数	0.01

4.2 有效性验证

为了验证直流电容虚拟惯性控制的有效性,在系统等效惯性一致的前提下,对比分析直流电容虚拟惯性控制、传统转子虚拟惯性控制和增加发电机惯性时间常数的控制效果。设定等效惯性时间常数为 3.2 s,直流电容提供的虚拟惯性时间常数 H_{dc} 为 3.2 s ($C_{dc} = 291$ mF, $V_{dc0} = 2$ kV, $\Delta V_{max} = 0.2$ pu)。增加发电机的惯性时间常数 H_g 为 5.33 s (风机不提供虚拟惯性,增加发电机的惯性时间常数让系统的

等效惯性等于风机提供虚拟惯性后的等效惯性),式(19)为计算系统等效惯性时间常数的方法。转子传统虚拟惯性控制下风机转子提供的虚拟惯性 H_{RVIC} 为 3.2 s。即采用 4 种不同的控制方式,分别为:案例 1,无虚拟惯性控制 $H_g = 3.2$ s;案例 2,增加发电机惯性 $H_g = 5.33$ s;案例 3,传统转子虚拟惯性控制;案例 4,直流电容虚拟惯性控制。图 8 为仿真对比图。

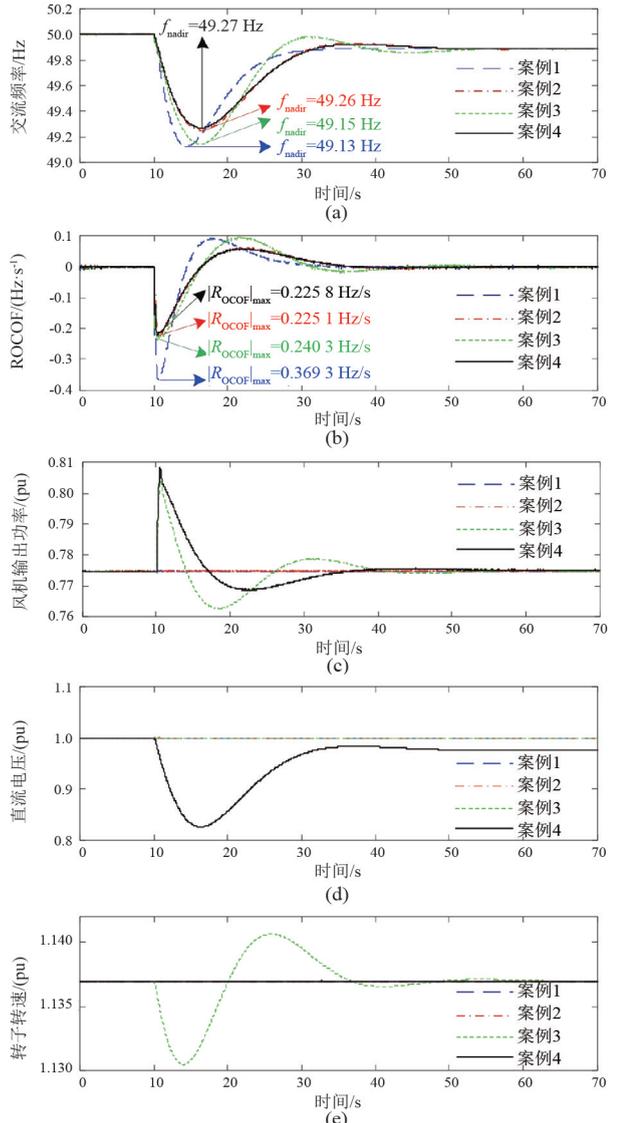


图 8 不同控制方式的对比

$$H_{eq} = \frac{\sum_1^m H_{g-i} S_{g-i}}{\sum_1^m S_{g-i} + \sum_1^n S_{w-j}} \quad (19)$$

式中: H_{eq} 为含风电的交流系统等效惯性时间常数; H_{g-i} 为第 i 台发电机的惯性时间常数; S_{g-i} 为第 i 台发电机的额定容量; S_{w-j} 为第 j 台风机的容量; m 为

交流系统中发电机的数量; n 为交流系统中风机的数量。

从图 8(a) 和 (b) 可知: 1) 无虚拟惯性控制下的最低频率 f_{nadir} 为 49.13 Hz, 频率跌落了 0.87 Hz, 频率变化的最大斜率 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 达到了 0.369 3 Hz/s; 2) 采用传统的转子虚拟惯性控制时, 频率跌落限制在了 0.85 Hz, 相对无虚拟惯性控制提升了 2.3%, $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 限制在了 0.240 3 Hz/s, 相对无虚拟惯性控制提升了 34.9%; 3) 直流电容虚拟惯性控制下, 频率跌落限制在了 0.73 Hz, 相对无虚拟惯性控制提升了 16.1%, $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 限制在了 0.225 8 Hz/s, 相对无虚拟惯性控制提升了 38.9%。

从图 8(c) 和图 8(e) 可知: 1) 无虚拟惯性控制时, 风机输出的功率和风机转速保持不变, 风机不响应交流系统的频率变化。2) 传统转子虚拟惯性控制下, 由于风机释放动能提供惯性支撑, 转速下降, 风机从功率跟踪曲线获取的参考功率下降, 削弱了风机提供频率支撑的能力, 如图 8(c) 所示风机提供的附加功率先于直流电容虚拟惯性控制下的附加功率过零。这也可以解释传统转子虚拟惯性控制对 ROCOF 抑制效果好而对频率最低点的提升不大。3) 在系统等效惯性时间常数一样的前提下, 增加发电机的惯性时间常数与直流电容虚拟惯性控制在频率变化的趋势和波形上一致, ROCOF 的波形和变化趋势也一致。这说明直流电容虚拟惯性控制能够准确模拟同步发电机的惯性响应, 能够有效地为交流系统提供虚拟惯性, 改善频率的动态特性。4) 与传统转子虚拟惯性控制相比, 直流电容虚拟惯性控制最大的优势是不引入频率的微分项, 可以避免引入频率微分的高频噪声, 也不会影响风机的 MPPT 运行。

4.3 虚拟惯性时间常数影响因素验证

为了验证不同参数对直流电容虚拟惯性控制的控制效果影响, 设置 8 种仿真案例, 参数如表 3 所示。设定风速为 10 m/s, 图 9—图 11 分别为不同 C_{dc} 、 V_{dc0} 和 ΔV_{max} 对直流电容虚拟惯性控制效果的影响图, 表 4 为不同仿真案例的频率响应特性。

采用频率变化率绝对值的最大值 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 、频率最低值 f_{nadir} 和扰动后的稳定频率 f_{final} 作为评估恒定风速下所提控制方法的性能。 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$ 和 f_{nadir} 可以表示频率的动态特性, f_{final} 可以表示扰动后频率的稳态特性。

表 3 仿真案例参数

仿真案例	C_{dc}/mF	V_{dc0}/kV	$\Delta V_{\text{max}}/(\text{pu})$	$\Delta f_{\text{max}}/\text{Hz}$	H_{dc}/s
案例 5 ^①	100	2	—	—	—
案例 6	100	2	0.1	1	0.525
案例 7	200	2	0.1	1	1.050
案例 8	400	2	0.1	1	2.100
案例 9	100	3	0.1	1	1.181
案例 10	100	4	0.1	1	2.100
案例 11	100	2	0.2	1	1.100
案例 12	100	2	0.3	1	1.725

注: ①案例 5 没有采用直流电容虚拟惯性控制。

从图 9—图 11 和表 4 可知, 采用直流电容惯性控制后, 频率扰动过程中, 直流电压会随着交流频率降低而降低。这表明存储在直流电容中的静电能量为交流系统提供了频率支撑。增加直流电容 C_{dc} 、直流电压额定值 V_{dc0} 、直流电压最大允许偏差值 ΔV_{max} , 都可以减少频率变化的最大斜率 $|R_{\text{OCOF}}|_{\text{max}}$, 提高频率最低点 f_{nadir} , 改善频率的动态性能, 这与第 3 章理论分析相吻合。从风机输出的功率可以看出, 直流电容提供的是短暂的功率支撑, 是虚拟惯性支撑, 所以对最终频率 f_{final} 的改善作用不大。对于一些投运的风机, 直流额定电压都确定了, 在满足绝缘要求和不出 PWM 调制问题时, 应优先增加 ΔV_{max} , 再根据所需的 H_{dc} , 采用式 (18) 计算出所需的 C_{dc} 。

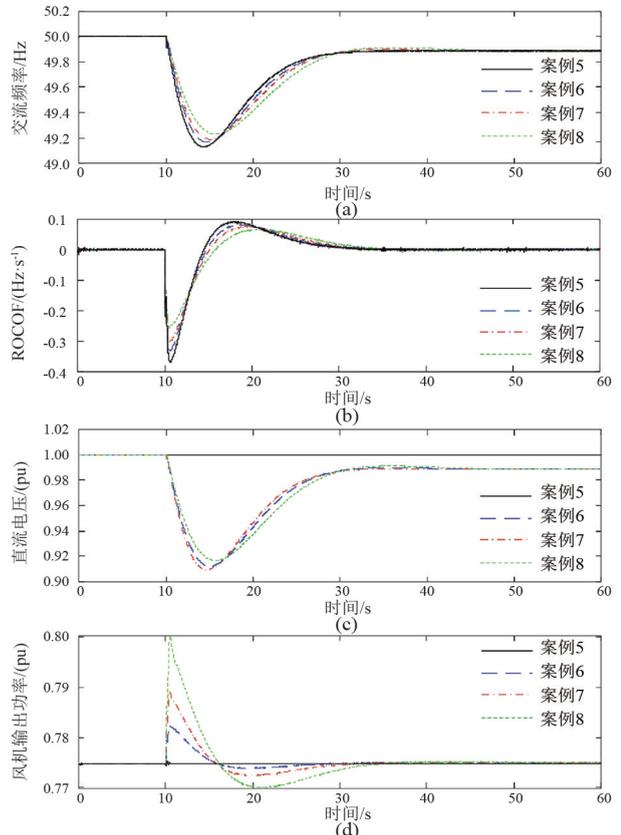


图 9 不同 C_{dc} 对虚拟惯性的影响

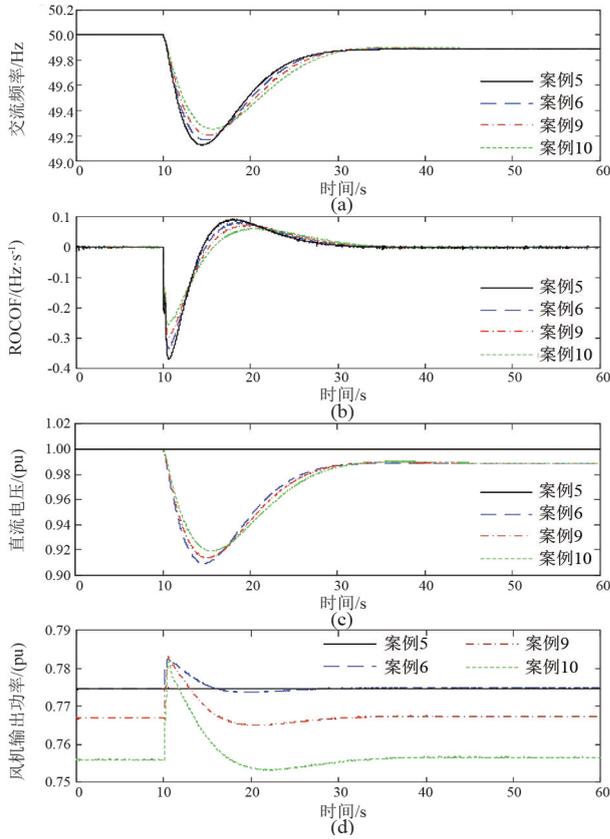


图 10 不同 V_{dc0} 对虚拟惯性的影响

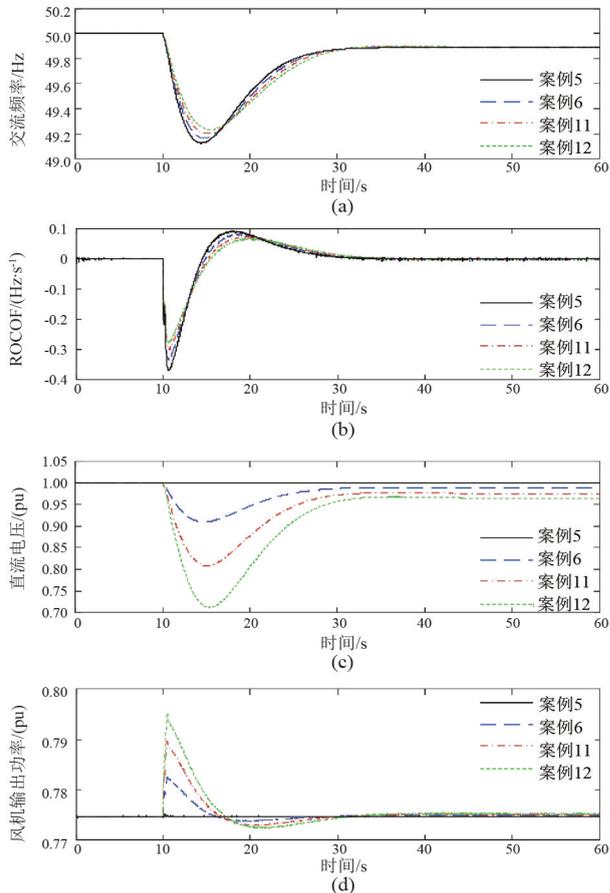


图 11 不同 ΔV_{max} 对虚拟惯性的影响

表 4 不同控制下的频率响应结果

仿真案例	$R_{OCOF} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	f_{nadir} / Hz	F_{final} / Hz
案例 5	0.369 2	49.13	49.89
案例 6	0.339 0	49.16	49.89
案例 7	0.303 9	49.20	49.89
案例 8	0.258 9	49.23	49.89
案例 9	0.296 3	49.21	49.89
案例 10	0.255 8	49.24	49.89
案例 11	0.301 6	49.20	49.89
案例 12	0.273 7	49.23	49.89

5 结 论

1) 直流电容虚拟惯性控制,利用存储在直流电容中的静电能为交流系统提供惯性支撑,定位为模拟同步发电机的惯性响应。在系统等效惯性时间常数一样的前提下,增加发电机的惯性时间常数与所提出的直流电容虚拟惯性控制在频率变化的趋势和波形上一致,也与 ROCOF 的波形和变化趋势一致。这说明所提出的直流电容虚拟惯性控制,能够准确地模拟同步发电机的惯性响应,能够有效地为交流系统提供虚拟惯性,改善频率的动态特性。这对于未来高比例风电接入的“低惯量”电力系统具有重要的工程意义。

2) 定量探究了影响直流电容提供虚拟惯性的关键影响因素,并给出了直流电容虚拟惯性控制参数的选取方法。增加直流电容 C_{dc} 、直流电压额定值 V_{dc0} 、直流电压最大允许偏差值 ΔV_{max} 都可以提高虚拟惯性。但对于一些投运的风机,直流额定电压已经确定,在满足绝缘要求和不出现在 PWM 调制问题前提下,应优先增加最大允许的直流电压偏差,再根据所需的虚拟惯性时间常数,计算直流电容。

3) 直流电容虚拟惯性的控制效果优于传统转子虚拟惯性控制。与传统转子虚拟惯性控制相比,直流电容虚拟惯性控制最大的优势是不引入频率的微分项,避免了引入频率的高频测量噪声,也不会影响风机的 MPPT 运行。

参考文献

[1] 刘洪波,彭晓宇,张崇,等.风电参与电力系统调频控制策略综述[J].电力自动化设备,2021,41(11):81-92.

reservoirs[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2016; 81-92.

- [9] BAHMANI-FIROUZI B, FARJAH E, AZIZIPANAH Abarghooee R. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. Energy, 2013,50:232-244.
- [10] MARICHELIVAM M K, PRABAHARAN T, YANG X S. Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop

(上接第16页)

- [2] 曾雪洋,张纯,王顺亮,等.基于减载系数变化的风电机组一次调频控制[J].电力自动化设备,2022,42(8):119-125.
- [3] 周天沛,孙伟.高渗透率下变速风力机组虚拟惯性控制的研究[J].中国电机工程学报,2017,37(2):486-495.
- [4] OCHOA D, MARTINEZ S. Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(5):4002-4011.
- [5] LI Y J, XU Z, ZHANG J L, et al. Variable gain control scheme of DFIG-based wind farm for over-frequency support[J].Renewable Energy, 2018,120:379-391.
- [6] 金铭鑫,王彤,黄世楼,等.含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(10):170-177.
- [7] 侍乔明,王刚,马伟明,等.直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(8):2033-2042.
- [8] MORREN J, DE HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006,21(1):433-434.
- [9] 李少林,王伟胜,张兴,等.基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制[J].电网技术,2021,45(5):1658-1665.
- [10] QU L, QIAO W. Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011,47(1):359-367.
- [11] 颜湘武,宋子君,崔森,等.基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2020,35(3):530-541.
- [12] HOWLADER A M, SENIYU T, SABER A Y. An integrated power smoothing control for a grid-interactive wind farm considering wake effects [J]. IEEE Systems Journal, 2015,9(3):954-965.

scheduling problems to minimize makespan[J]. Applied Soft Computing, 2014, 19: 93-101.

作者简介:

熊志杰(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及网络安全运行管理;

王彦泮(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及调控运行管理;

张大伟(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化运行管理。

(收稿日期:2022-09-01)

- [13] LYU X, ZHAO J, JIA Y W, et al. Coordinated control strategies of PMSG-based wind turbine for smoothing power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(1):391-401.
- [14] LICARI J, EKANAYAKE J, MOORE I. Inertia response from full-power converter-based permanent magnet wind generators [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013,1(1):26-33.
- [15] LI Y J, XU Z, WONG K P. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(4):2017.
- [16] LIU X G, XU Z, ZHAO J. Combined primary frequency control strategy of permanent magnet synchronous generator-based wind turbine [J]. Electric Power Components and Systems, 2018,46(11a15):1704-1718.
- [17] HANSEN A D, MICHALKE G. Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults [J]. IET Renewable Power Generation, 2009,3(3):333-348.
- [18] ARANI M F M, MOHAMED Y A I. Assessment and enhancement of a full-scale PMSG-based wind power generator performance under faults[J].IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016,31(2):728-739.
- [19] PADRON J F M, LORENZO A E F. Calculating steady-state operating conditions for doubly-fed induction generator wind turbines[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2010,25(2):922-928.
- [20] 王同森,张峰,丁磊.考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(6):22-28.
- [21] ZHU J B, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(2):1277-1287.

作者简介:

曾雪洋(1992),男,博士,研究方向为高压直流输电、新能源并网与控制。

(收稿日期:2022-08-15)