

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201320

基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法

蔡葆锐, 杨蕾, 黄伟

(云南电网有限责任公司电力调度控制中心, 云南 昆明 650200)

摘要: 在高渗透风电接入的孤立电力系统中, 由于传统调频资源不足, 风电大规模波动可能导致系统频率波动, 限制新风电的进一步接入。因此, 提出一种基于惯性控制和下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法。首先对双馈异步发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)、永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)和有源失速异步发电机(Active-Stall Induction Generator, ASIG)三种类型变速风力发电机组(Variable Speed Wind Turbines, VSWTs)的频率控制特性进行分析。在此基础上, 提出基于惯量控制和下垂控制的变速型风机频率协调控制策略, 并分析在不同扰动条件下, 不同惯性参数与下垂参数对孤立电力系统频率的影响, 据此选择合适的控制参数。最后, 在随机风速扰动和大扰动条件下对风电机组的稳态与暂态响应进行仿真, 验证了所提频率抑制方法的有效性。结果表明, 所提方法能显著提高孤立电力系统频率稳定水平。

关键词: 孤立电力系统; 高渗透率风电接入; 频率控制; 惯性控制; 下垂控制

Frequency coordination control of a variable speed wind turbine based on inertia/droop control

CAI Baorui, YANG Lei, HUANG Wei

(Electric Power Dispatching and Control Center of Yunnan, Kunming 650200, China)

Abstract: Large scale fluctuation of wind energy power may lead to system frequency fluctuation because of the shortage of traditional frequency modulation resources in an isolated power system with high permeability access. This limits the further access to new wind energy power. Hence, this paper presents a frequency coordination control method of a variable speed wind turbine based on inertial and droop control. First, the frequency control characteristics of three types of Variable Speed Wind Turbines (VSWTs) are analyzed, including those of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG), a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) and an Active Stall Induction Generator (ASIG). From this, a frequency coordination control strategy of a variable speed wind turbine based on inertial and droop control is proposed, and the influence of different inertia and droop parameters on the frequency of isolated power system under different disturbance conditions is analyzed. From this, the appropriate control parameters can be selected. Finally, the steady-state and transient responses of wind turbines are simulated under the condition of random wind speed disturbance and large disturbance, and the effectiveness of the proposed frequency suppression method is verified. The results show that the proposed method can significantly improve the frequency stability of an isolated power system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61963020) and the Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Company: Yunnan Power Grid Stability Control Technology Research and Closed Loop Simulation Platform with Multiple DC and High Proportion of New Energy (No. KJDK2018210).

Key words: isolated power system; high-penetrated wind power; frequency control; inertial control; droop control

0 引言

随着能源枯竭和环境污染的日益严重, 以风电

为代表的清洁能源在电力系统中的接入比例越来越高^[1-2], 但风电具有强烈的不确定性, 高渗透率风电波动会对系统频率产生不利影响, 尤其对于孤立电力系统, 其电气连接不紧密, 频率支撑能力弱, 风电波动往往引起较大的频率偏移, 进而导致发电损失和系统不稳定^[3-7]。因此, 含高渗透率接入的孤立电力系统频率控制是目前研究热点之一。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61963020); 云南省电网公司科技项目资助“多直流与高比例新能源的云南电网稳控拓展技术与闭环仿真平台”(KJDK2018210)

目前国内外学者在该研究方向上已有一定成果。文献[8]通过改进常规自动发电控制系统的区域控制偏差模型和控制器,对风电场输出功率扰动引起的频率波动进行抑制;但是,对于风电接入的孤立电力系统,其频率调节资源不足,仅依靠传统电源的控制手段代价较大,需要机组保留足够的热备用容量。风电机组作为高渗透率接入系统的重要电源,除具有传统的低压穿越能力外^[9],现代电力系统还要求风电机组尽可能具备类似于常规电源的频率调节能力^[10-11]。因此,风电机组参与电力系统一次调频控制方法成为新的研究方向。文献[12]分析风机矢量控制和转子动能控制策略原理、转子动能控制策略的作用过程;并基于风机运行区域和转子动能控制适用范围的分析,提出一种与DFIG调频控制能力相适应的调频方案。该方案能够根据风机运行状况,合理控制DFIG参与系统调频;文献[13]以永磁直驱风机系统为例,提出一种直驱风电系统自适应惯量和一次调频协调控制方法,该方法可将直驱风电系统的惯量支撑以及一次调频支撑集成在一起,风电场自适应选择合理的风力机功率跟踪曲线,实现电网调频需求,尽可能减少因调频控制导致的风能利用效率的降低,同时还可削弱惯量响应过程中原控制系统外环对 df/dt 前馈控制环的抵消作用,但均未能使风力机长期工作在 MPPT 状态,造成部分风资源的浪费;文献[14]针对双馈变速风电机组采用双脉宽调制变流器实现电磁与机械的解耦控制,可以实现对频率的响应控制,但该方法响应速度较慢;文献[15]通过研究双馈变速风电机组虚拟惯性响应时变特性和一次调频响应特性,提出基于低频减载的调频方法。但是上述方法多针对双馈风电机组进行控制,而目前实际投运的风机类型中其他变速型风机也较多;且上述方法仅利用风电备用容量或者旋转储能进行频率控制,未考虑两者的协调控制,仍具有进一步挖掘的空间。

针对上述问题,本文首先分析不同类型变速型风机的频率控制特性,在此基础上,提出基于惯量控制和下垂控制的变速型风机频率协调控制策略,并分析在不同扰动条件下,不同惯性参数与下垂参数对孤立电力系统频率的影响,据此选择合适的控制参数,可显著提高渗透率风电接入孤立电力系统的频率稳定水平。

1 变速型风力发电机模型与频率控制

1.1 双馈异步风力发电机模型与频率控制

双馈异步发电机(Doubly Fed Induction Generator,

DFIG)典型结构,如图 1 所示。其模型组成主要包括电气元件、机械、空气动力学子系统以及变桨距控制系统^[16-18]。DFIG 控制器框架,如图 2 所示。双惯量分别对应转子和发电机,用于表示风机驱动系统,两者通过变速箱由柔性低速轴连接。其中,当高于额定风速时,变桨距控制器通过具有防卷绕特性 PI 控制器调节转子速度^[19]。

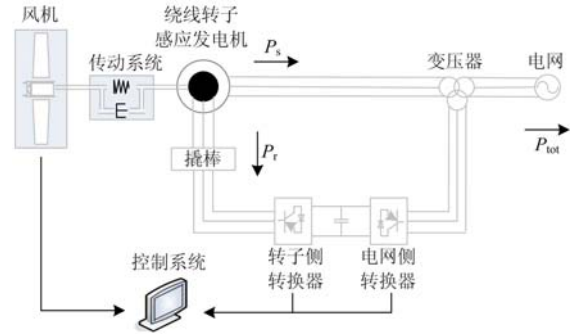


图 1 DFIG-VSWT 配置

Fig. 1 DFIG-VSWT configuration

换流器控制系统采用有功和无功功率解耦的矢量控制^[20]。转子侧换流器控制输送到系统的有功和无功功率 P_{grid} 和 Q_{grid} ,而电网侧换流器对单位功率下的直流电压 U_{dc} 进行调节^[21],如图2所示。该控制器基本原理是通过设定外部功率控制回路的额定值,经过外环PI控制环节生成内部电流控制器的额定值,构成双闭环系统进行频率控制。

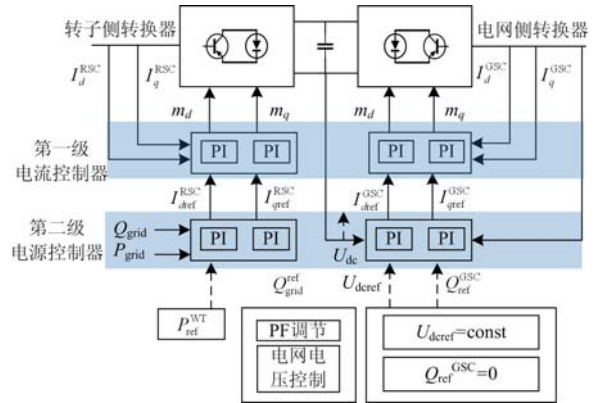


图 2 DFIG-VSWT 换流器控制方案

Fig. 2 Converter control scheme for the DFIG-VSWT

1.2 永磁同步风力发电机模型与控制

永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)典型结构,如图3所示。PMSG-VSWT的机械和空气动力学模型部分与DFIG-VSWT相似^[22-23]。

PMSG控制器框架,如图4所示。阻尼控制器根据发电机转速 ω_{gen} 对直流电压额定值 $U_{dc,ref}$ 进行设

定, 以减少传动系统中的转矩波动。发电机侧换流器将直流电压 U_{dc} 和定子电压 U_s 调节至定子电压的额定值^[24]。电网侧换流器可以独立调节系统中电压的有功和无功功率 P_{grid} 和 Q_{grid} ^[25]。

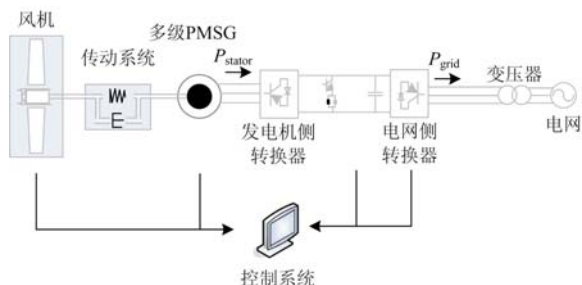


图 3 PMSG-VSWT 配置

Fig. 3 PMSG-VSWT configuration

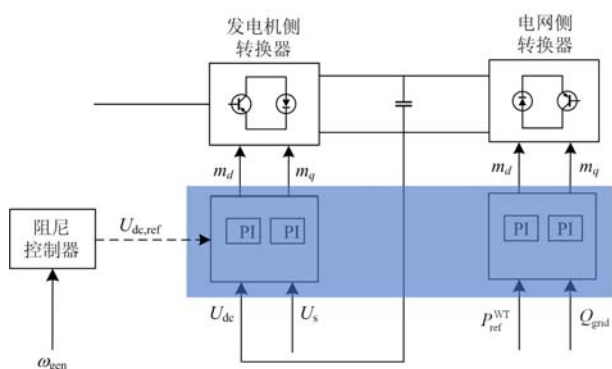


图 4 PMSG-VSWT 换流器控制方案

Fig. 4 Converter control scheme for the PMSG-VSWT

1.3 有源失速异步风力发电机模型与控制

有源失速异步发电机 (Active-Stall Induction Generator, ASIG) 典型结构, 如图 5 所示。模型组成包括空气动力学子系统、机械以及电气元件等^[26]。

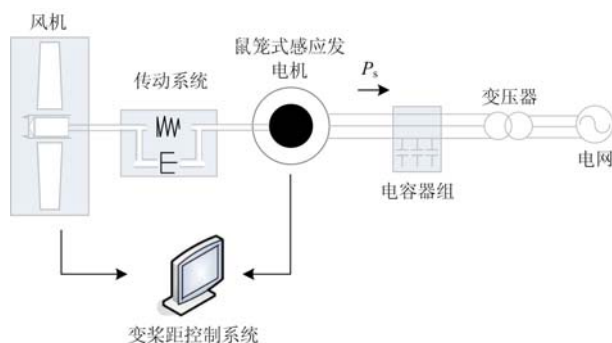


图 5 ASIG-VSWT 配置

Fig. 5 ASIG-VSWT configuration

其中, ASIG 由双惯量模型来表示风机驱动系统。当高于额定风速时, 通过变桨距控制系统对功率进行调节, 以达到限制效果。

2 基于惯性控制、下垂控制的频率抑制策略

孤立电力系统一般依赖传统电源对频率波动进行抑制。其中, 一次调频控制由快速火电机组(如内燃机、联合循环机组和燃气机)执行, 而二次调频控制通过自动发电控制系统或系统操作员进行。随着风电渗透率提高, 风电机组中频率响应特性成为高渗透率接入孤立电力系统频率控制的关键因素。

2.1 变速型风电机组的频率响应特性

以失电源故障为例, 当电力系统失去重要电源后, 孤立电力系统所产生的频率扰动, 如图 6 所示。

对于频率偏差, 不同变速风力发电机组呈现不同响应特性, 结果如图 7 和图 8 所示。由图可知, 对于 PMSG-VSWT 和 DFIG-VSWT, 频率变化对转子转速和有功功率几乎没有影响。此外, 由于 ASIG-VSWT 转子速度变化趋于系统频率变化, 产生转子动能变化直接转化为有功功率变化, 因此 ASIG-VSWT 能在扰动情况下提供显著的动态响应特性。

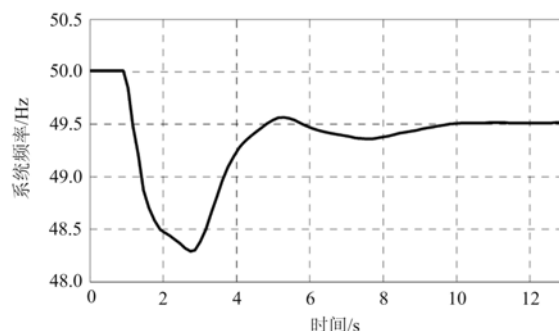


图 6 失电源后的系统频率

Fig. 6 System frequency after a loss of generation

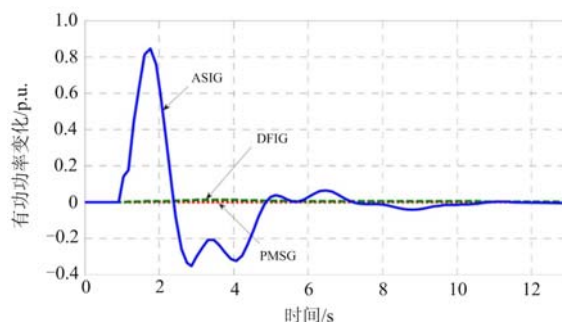


图 7 失电源后风机有功功率变化

Fig. 7 WT active power variation after a loss of generation

2.2 变速型风电机组的频率控制策略

本节提出一种适用于变速型风电机组的频率控制器, 该控制器综合惯性控制和下垂控制两种频率

响应方式,形成一种基于组合控制的频率控制方法。其中,该控制器可根据实际情况选择一种或其组合在系统中进行应用,结构如图9所示。

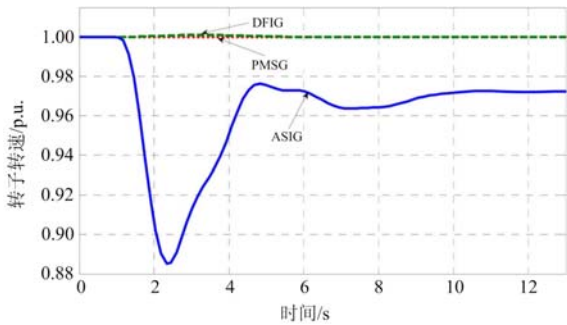


图8 失电源后的风机转子速度变化

Fig. 8 WT rotor speed variation after a loss of generation

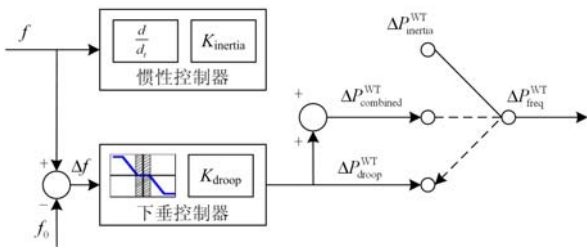


图9 VSWTs的频率控制器

Fig. 9 Frequency controller for VSWTs

风电机组的下垂控制与传统发电机类似,输出功率变化与系统频率偏移成比例关系,如式(1)。

$$\Delta P_{\text{droop}}^{\text{WT}} = K_{\text{droop}}(f - f_0) \quad (1)$$

式中, f_0 表示额定频率。

系数 K_{droop} 与参数 R 互为倒数,如式(2)所示。

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta p} = \frac{1}{K_{\text{droop}}} \quad (2)$$

此外,为了防止风机频率控制策略在正常的 50 Hz 附近(50 ± 0.2 Hz)频繁启动,在频率接近 50 Hz 时设置下垂控制死区,如图 10 所示。

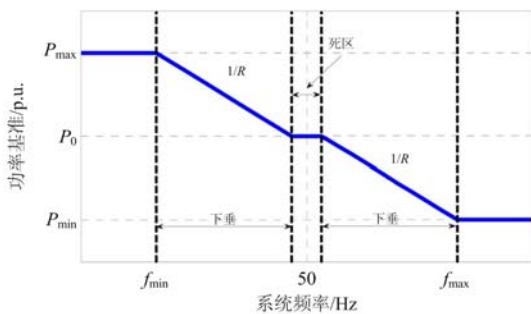


图10 下垂控制频率特性

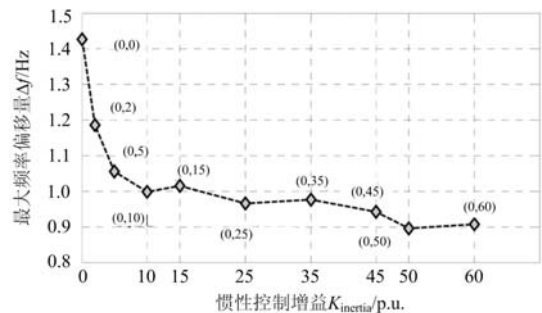
Fig. 10 Droop frequency control characteristic

根据惯性控制原理,风电系统对频率变化做出的响应,通常称为“虚拟惯性”效应。风电频率偏差信号通过惯性控制与下垂控制所构成的组合控制器输出有功功率参考信号。在大扰动条件下,惯性控制能提高系统暂态响应性能,而下垂控制能提高稳态响应性能。两者结合有助于系统在不同工况下进行频率控制。因此,需结合传统发电机惯性参数和下垂参数,对风电机组参数进行有效调整,以减少孤立电力系统稳态误差,并且提供暂态响应下理想有功功率。

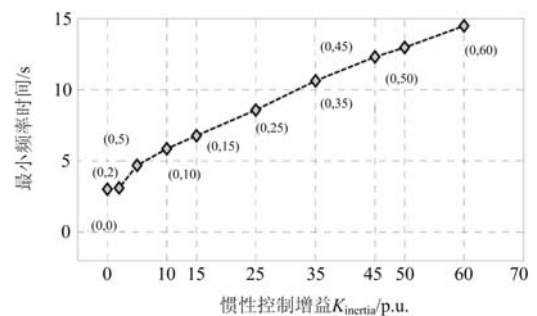
3 变速型风机频率参数分析

3.1 惯性参数分析

在扰动条件下,仅考虑惯性控制器研究其惯性参数 K_{inertia} 对系统频率影响。采用不同惯性参数 ($K_{\text{droop}}, K_{\text{inertia}}$) 进行仿真,其中数组表示下垂参数与惯性参数的绝对值,单位为 p.u.。设定 K_{droop} 为 0,观察不同惯性参数下的系统频率响应结果,如图 11 所示。



(a) 惯性参数与最大频率偏移关系



(b) 惯性参数与达到最小频率时间关系

图11 不同惯性参数下频率响应

Fig. 11 Frequency response under different inertia parameters

图11(a)反映惯性参数与最大频率偏移关系,图11(b)反映惯性参数与达到最小频率时间关系。图11中惯性参数从0增至50 p.u.,其最大频率偏移量从1.44 Hz减至0.9 Hz,而达到最小频率时间增至14 s左右。

由于信号发生功率偏移时精度较差, 无法满足控制需求, 因此, 采用基于最小二乘法(Least Square, LS)下频率变化率(Rate-Of-Change-Of-Frequency, ROCOF)测量方法^[27-28]。根据对频率偏移的稳态信号所获取的相量值, 利用基于最小二乘法过程的二阶多项式逼近计算动态变化的频率, 如式(3)所示。

$$f(t) = d_0 + d_1 t + d_2 t^2 \quad (3)$$

式中: d_0 、 d_1 和 d_2 表示多项式系数; t 代表时间。

将式(3)离散化, 转换成矩阵形式, 如式(4)所示。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(t_0) \\ f(t_1) \\ \vdots \\ f(t_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 \\ 1 & t_1 & t_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_M & t_M^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_f \mathbf{D} \quad (4)$$

式中: \mathbf{F} 为 $(M+1)$ 个相邻频率测量数值组成的列向量; \mathbf{D} 为多项式系数组成的列向量; \mathbf{P}_f 由 M 和计算频率 f_c 决定; t_0 至 t_M 的表达式见式(5)。

$$[t_0, t_1, \dots, t_M] = \begin{bmatrix} -\frac{M/2}{f_c}, -\frac{(M-1)/2}{f_c}, \dots, 0, \dots, \\ \frac{(M-1)/2}{f_c}, \frac{M/2}{f_c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对式(4)采用最小二乘法, 即可求得多项式拟合系数, 如式(6)所示。

$$\mathbf{D} = (\mathbf{P}_f^T \mathbf{P}_f)^{-1} \mathbf{P}_f^T \mathbf{F} \quad (6)$$

最后对式(3)求导, 可求得 ROCOF 为 d_1 , d_1 的值可根据式(6)求得。

根据上述公式可知, 孤立电力系统中 ROCOF 也相应减小。其中 ROCOF 参数可通过触发减载保护系统, 防止频率波动过大, 导致系统不稳定。综上所述, 当惯性参数超过 10 p.u. 时, 尽管惯性参数的增加会导致 ROCOF 的减小, 但是频率偏移抑制效果不明显。

通过不同惯性控制器的参数值($K_{\text{droop}}, K_{\text{inertia}}$)对扰动下的 DFIG-VSWT 和燃气机输出有功功率变化进行仿真, 如图 12 所示。

图 12(a)为 DFIG-VSWT 下的仿真, 图 12(b)为燃气机下的仿真。惯性参数的增加, 导致 DFIG-VSWT 以及燃气机有功功率峰值的降低。因此, 当惯性参数小于 10 p.u. 时, 提高风电机组的惯性控制器的惯性参数对传统以及风电机组的运行有着积极的影响。综上, 本文选取惯性参数为 10 p.u.。

3.2 下垂参数分析

在扰动条件下, 仅考虑下垂控制器研究其惯性参数 K_{droop} 对系统频率影响。采用不同下垂参数

($K_{\text{droop}}, K_{\text{inertia}}$)进行仿真, 其中 K_{inertia} 设定为 0。在无惯性控制器以及相同扰动情况下, 针对 VSWTs, 进行下垂参数与系统频率、有功功率变化关系仿真, 结果如图 13 所示。

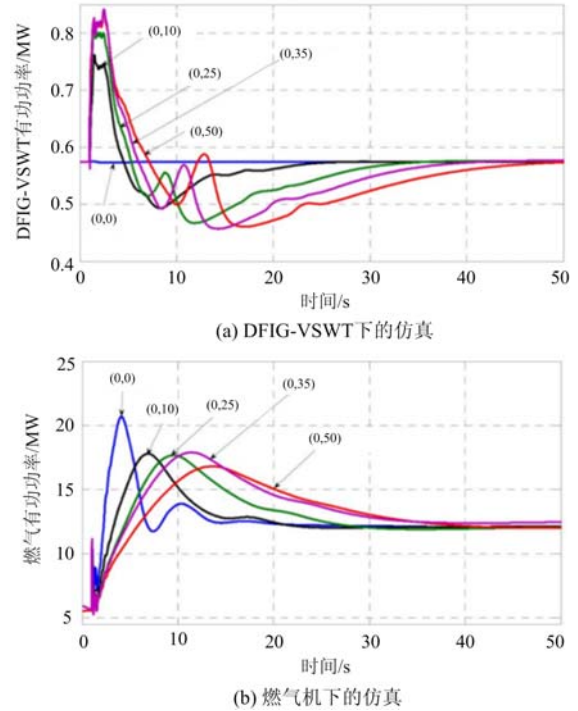
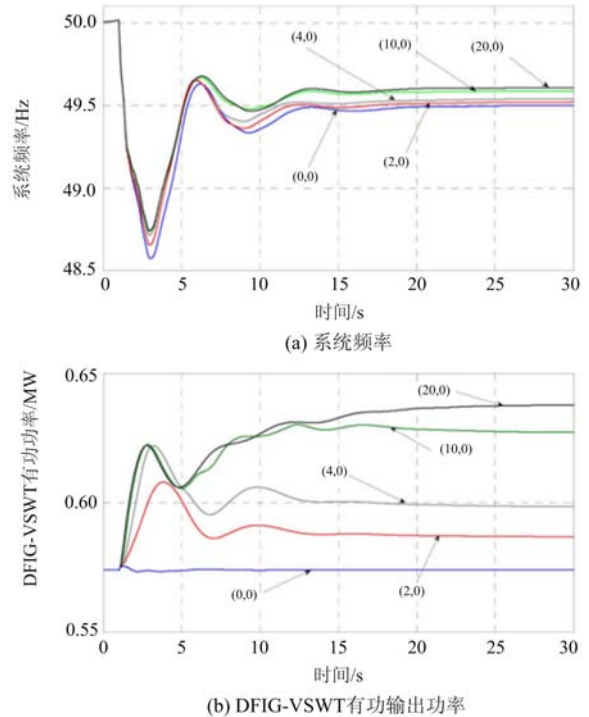


图 12 扰动下不同惯性参数的输出功率

Fig. 12 Output power of different inertia parameters under disturbance



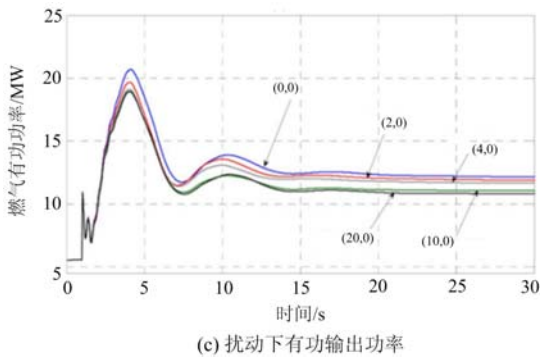


图 13 不同下垂参数的频率响应

Fig. 13 Frequency response of different droop parameters

图 13(a)为系统频率, 图 13(b)为 DFIG-VSWT 有功输出功率, 图 13(c)为扰动下有功输出功率。结果表明, 提升下垂参数无法显著改善暂态响应, 但是较大的下垂参数能缩短系统频率回稳时间。此外较大下垂参数产生的最大频率偏移也更小。因此在扰动条件下, 较大下垂参数有利于风力发电机进行频率控制。

4 仿真验证

4.1 系统参数

为验证基于惯性控制与下垂控制组合控制方法下频率响应在孤立电力系统中有效性, 以某孤立电力系统作为研究系统。该系统包括一个 110 kV 输电网络、两个火力发电厂和五个风电场, 如图 14 所示。

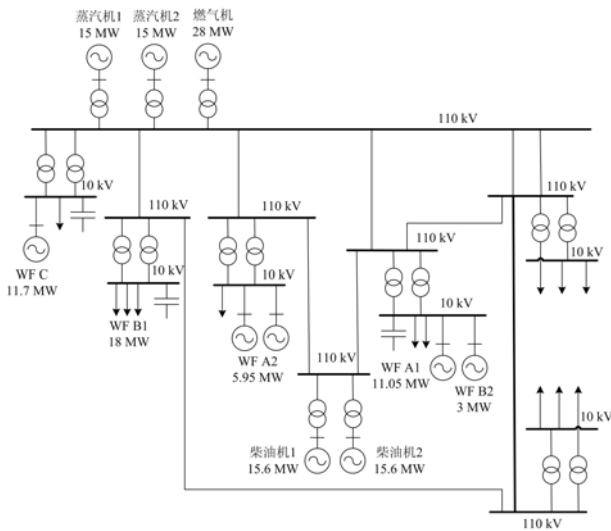


图 14 孤立电力系统

Fig. 14 Isolated power system

基于 ASIG、DFIG 和 PMSG 的 VSWTs 的系统数据, 如表 1 所示。传统发电机组基本参数, 如表 2 所示。

表 1 系统中的风电场

Table 1 Wind farms in the system

| 风电场 | WT 类型 | 风机台数 | 总装机容量/MW |
|-------|-------|------|----------|
| WF A1 | DFIG | 13 | 11.05 |
| WF A2 | DFIG | 7 | 5.95 |
| WF B1 | PMSG | 9 | 18 |
| WF B2 | PMSG | 5 | 3 |
| WF C | ASIG | 13 | 11.7 |

表 2 传统发电机组运行基本数据

Table 2 Basic data of conventional units in operation

| 单元 | 额定容量/ MW | 惯性/ (MW·s/MVA) | R/p.u. |
|---------|-------------|-------------------|--------|
| 蒸汽机 1&2 | 15 | 3.82 | 0.05 |
| 燃气机 | 28 | 1.5 | 0.04 |
| 柴油机 1&2 | 15.6 | 2 | 0.04 |

传统发电机组中包括一台燃气机、两台蒸汽机和两台柴油机。在实验系统中, 蒸汽机与柴油机的额定容量约为 15 MW, 而燃气机的额定容量可达到 28 MW。

4.2 稳态响应分析

由于孤立电力系统受到风速波动的严重影响, 因而会导致系统中大幅的频率变化。为研究频率控制在正常风速波动情况中运行效果, 利用如图 15 所示的风速时间序列, 在随机风速扰动的件下模拟该孤立电力系统中稳态响应。

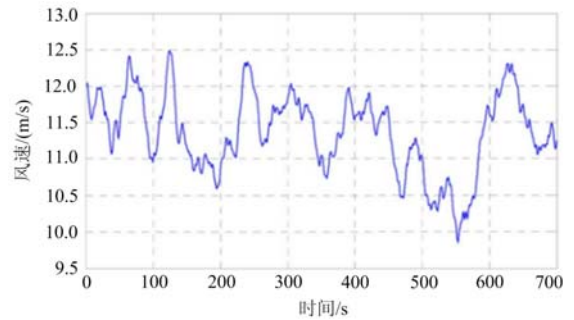


图 15 WFs 中风速时间序列

Fig. 15 Wind speed time series of the WFs

在所给风速时间序列的情况下, 风电功率最大波动幅度为 13.2 MW。对 VSWTs 在不同频率控制下的稳态响应进行仿真验证, 其仿真结果如图 16 所示。其中包括无频率控制(a)、下垂控制(b)、惯性控制(c)以及惯性和下垂的组合频率控制(d)时的响应。

根据上节中对 VSWTs 中惯性参数以及下垂参数的分析, 本次研究中设定下垂控制的控制器参数为 $K_{droop}=20$ p.u.(即 $R=5\%$), 惯性控制中惯性参数为

$K_{inertia}=10$ p.u., 组合控制方法中各参数为 $K_{droop}=20$ p.u., $K_{inertia}=10$ p.u.。

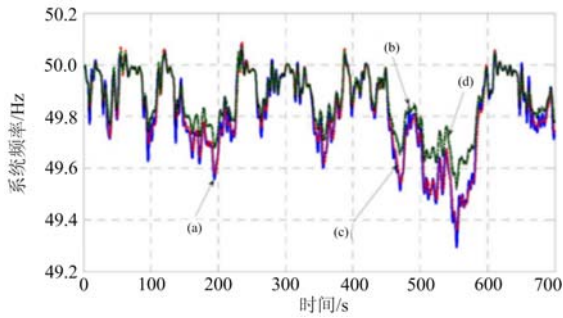


图 16 PMSG-VSWT 正常运行时系统频率变化
Fig. 16 System frequency variation of PMSG-VSWT in normal operation

通过仿真结果可知, 惯性控制与无频率控制下 PMSG-VSWT 系统频率变化曲线几乎重合。由于惯性控制中导数作用, 导致其无法在大型风电系统中进行频率控制。而当 ROCOF 达到约 0.1 Hz/s 时, 下垂控制在不同的风速波动下处理结果与组合控制中所产生效果相同, 频率偏移达到 0.2 Hz。因此, 系统中惯性控制器只提供暂态响应, 对于扰动引起频率快速变化中最有效。此外, 下垂控制提供稳态响应, 在相对稳定过程中有效。在随机风速扰动条件下, 需同时避免系统中频率稳态与暂态误差。系统稳态响应中, 针对于 PMSG-WT 有功功率变化的仿真验证, 如图 17 所示。

图中(a)、(b)、(c)、(d)分别代表无频率控、下垂控制、惯性控制以及组合控制。由于风电系统中能量损耗由系统中有功功率所决定, 因此, 仿真进一步表明在稳态响应中组合控制效果与下垂控制相同, 可有效减少系统中频率的稳态误差。然而, 为有效抑制频率波动, 需要同时减少暂态误差与稳态误差, 因此需结合惯性控制方法, 以此降低暂态响应中的误差。

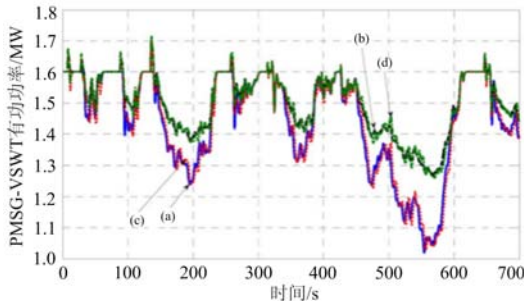


图 17 PMSG-VSWT 稳态响应中有功功率变化
Fig. 17 Active power variation of PMSG-VSWT in steady state response

4.3 暂态响应分析

在本节中, 考虑大扰动条件下系统的暂态频率响应。故障设置为 15 MW 的#1 蒸汽机故障退出运行, 所有风力发电机以恒定风速运行, 并对所有风力发电机实施频率控制, 得到不同控制方法的系统频率暂态响应仿真结果如图 18 所示。图中(a)代表无频率控制, (b)代表下垂控制, (c)代表惯性控制, (d)代表组合控制。无频率控制时, 仿真中频率偏移约 1.4 Hz。下垂控制仅改善最小频率, 而扰动后 ROCOF 保持不变, 这表明下垂控制方法无法在暂态响应中产生显著效果。另外, 由于转子速度和动能需恢复至稳态, 此过程中在惯性控制下, 响应时间增加。而采用组合控制方法, 时间更短。

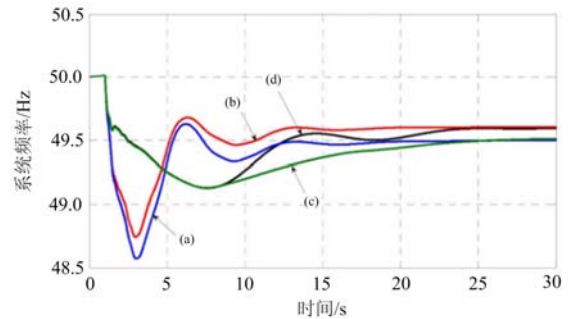


图 18 大扰动条件下系统频率
Fig. 18 System frequency under big disturbance

针对扰动条件下, PMSG-VSWT 暂态性能中转子速度以及有功功率的变化, 如图 19 和图 20 所示。

图中(a)代表无频率控制, (b)代表下垂控制, (c)代表惯性控制, (d)代表组合控制。当无频率控制时, VSWT 转子转速与有功功率几乎不受影响。其次, 在频率控制器条件下, 转子速度减少导致有功功率的增加。而转子转速下降越大, 扰动下的暂态有功功率变化幅度越大, 对频率偏移影响越积极。仅在惯性控制下时, 其频率控制效果在主控制周期后大幅度削减, 有功功率恢复至初始水平。当有下垂控

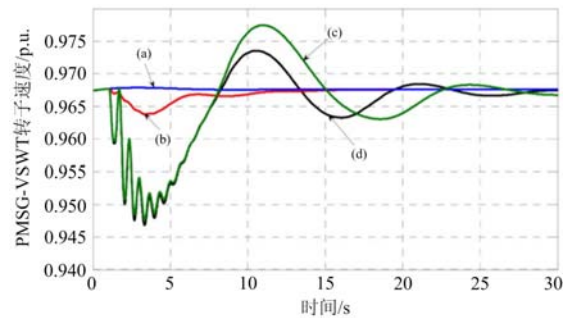


图 19 扰动条件下 PMSG-VSWT 转子速度
Fig. 19 PMSG-VSWT rotor speed under the disturbance

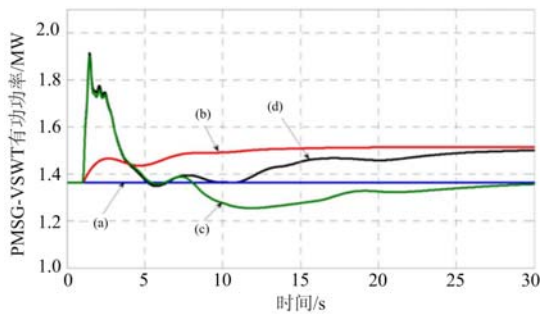


图 20 扰动条件下 PMSG-VSWT 有功功率

Fig. 20 Active power of a PMSG-VSWT under the disturbance
制参与时, PMSG-VSWT 的有功功率增加, 导致传统发电中旋转储能相应地减少。

综上所述, 惯性和下垂组合频率控制方法在稳态响应和暂态响应中均能保持良好的频率波动抑制效果, 可以同时减少暂态误差与稳态误差。

5 结论

针对高渗透率风电接入的孤立电力系统, 风电波动可能导致频率波动问题, 本文提出一种适用 VSWTs 的频率控制器。最后通过仿真验证所提方法的有效性, 获得结论如下:

1) 为了保证调频需要, 发电机需采用减载方案。而 ROCOF 参数可触发减载保护系统, 使频率保持在可接受变化范围内, 避免系统中所产生的误差。

2) 在扰动条件下, 当惯性参数和下垂参数均小于 10 p.u.时, 提高频率组合控制器中惯性参数与下垂参数, 对系统传统发电机与风力发电机组的运行以及频率控制有着积极的影响。

3) 惯性控制器能提高系统暂态响应性能, 对于风速扰动下频率快速变化情况控制效果最佳。其次, 下垂控制导致有功功率增加, 其效果体现在稳定恢复过程中。为同时减少暂态误差和稳态误差, 采用惯性和下垂组合频率控制方法的控制性能最佳。

未来的工作将继续集中在大型风电场中的频率控制方案, 以及最佳参数的选择。

参考文献

[1] 汪惟源, 窦飞, 程锦闽, 等. 一种风光联合出力概率模型建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 22-29.
WANG Weiyuan, DOU Fei, CHENG Jinmin, et al. A modeling method for a wind and photovoltaic joint power probability model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 22-29.

[2] 邓王博, 王海云, 常喜强, 等. 大规模直驱风电场次同步振荡的影响因素分析[J]. 高压电器, 2019, 55(6):

218-224.
DENG Wangbo, WANG Haiyun, CHANG Xiqiang, et al. Analysis of influencing factors of subsynchronous oscillation in large-scale direct-driven wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 218-224.

[3] 陈池瑶, 陈晓明. 基于清洁能源消纳的风电规模入网机组启停间歇控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 100-104.
CHEN Chiyao, CHEN Xiaoming. A study on start-stop intermittent control of large-scale wind power units based on clean energy absorption[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 100-104.

[4] 李强年, 赵巧妮, 聂龑. 基于层次分析法(AHP)的风电产业发展影响因素探析——以甘肃省酒泉风力发电基地为例[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 75-81.
LI Qiangnian, ZHAO Qiaoni, NIE Yan. Research on the factors affecting the development of wind power industry based on analytic hierarchy process (AHP)—taking Jiuquan wind power generation base in gansu province as an example[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 75-81.

[5] 宁世超, 吕林, 刘友波, 等. 高渗透率风电接入下地区高压电网转供模型[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 46-54.
NING Shichao, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Transfer model of regional high-voltage power system containing high penetration of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 46-54.

[6] 齐方方, 王海云, 常鹏. 含风电的混合直流输电并网系统暂态特性分析[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 201-206.
QI Fangfang, WANG Haiyun, CHANG Peng. Analysis on transient characteristics of hybrid DC transmission connected-grid system with wind power[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 201-206.

[7] LIN Z, CHEN H, WU Q, et al. Mean-tracking model based stochastic economic dispatch for power systems with high penetration of wind power[J]. Energy, 2020, 193.

[8] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 50-58.
WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 50-58.

[9] ALEPUZ S, CALLE A, BUSQUETS-MONGE S, et al. Use of stored energy in PMSG rotor inertia for low-voltage ride-through in Back-to-Back NPC converter-based wind power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1787-1796.

[10] CHEN H, JOHNSON M H, ALIPRANTIS D C. Low-frequency AC transmission for offshore wind power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2236-2244.

- [11] YI T, DAI J, WANG Q. A fast method to estimate maximum penetration level of wind power considering frequency cumulative effect[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(9): 1726-1733.
- [12] 张旭, 查效兵, 岳帅. 基于转子动能控制的 DFIG 调频能力分析 with 调频方案[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(3): 141-147.
ZHANG Xu, ZHA Xiaobing, YUE Shuai. Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doubly fed induction generator based on the rotor kinetic energy control[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(3): 141-147.
- [13] 赵晟凯, 邹欣, 李旭霞, 等. 直驱风电系统自适应惯量和一次调频协调控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(9): 76-84.
ZHAO Shengkai, ZOU Xin, LI Xuxia, et al. Adaptive inertia and primary frequency modulation coordinated control strategy of PMSG system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(9): 76-84.
- [14] 颜湘武, 李君岩, 魏星. 直驱永磁同步风电机组在全风速范围内的控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(23): 138-144.
YAN Xiangwu, LI Junyan, WEI Xing. Research on control strategy of direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine in full wind speed range[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(23): 138-144.
- [15] 李世春, 吕翔生, 钟浩, 等. 大规模双馈风电机组参与调频的电网自适应低频减载策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(15): 109-120.
LI Shichun, LÜ Xiangsheng, ZHONG Hao, et al. Adaptive under-frequency load shedding strategy of power grid with large-scale DFIG wind turbines participating in frequency regulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(15): 109-120.
- [16] 卫鹏. 双馈异步风力发电机控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
WEI Peng. Strategies for control of double-fed induction wind turbines[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [17] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU X G, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 803-809.
- [18] 吴杰, 师庆丹, 李珊, 等. 考虑电缆选型双馈机组分散协调控制对风电场无功优化影响[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(2): 113-119.
WU Jie, SHI Qingdan, LI Shan, et al. The influence of decentralized and coordinated control of DFIG on reactive power optimization for wind farm considering cable selection[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(2): 113-119.
- [19] CHANG-CHIEN L R, LIN W T, YIN Y C. Enhancing frequency response control by DFIGs in the high wind penetrated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(2): 710-718.
- [20] ABOLVAFAEI M, GANJEFAR S. Maximum power extraction from fractional order doubly fed induction generator based wind turbines using Homotopy singular perturbation method[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 119.
- [21] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T, et al. A direct power control of a DFIG based-WECS during symmetrical voltage dips[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 36-47. DOI: 10.1186/s41601-019-0148-y.
- [22] LI J, WANG N, ZHOU D, et al. Optimal reactive power dispatch of permanent magnet synchronous generator-based wind farm considering levelised production cost minimisation[J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 1-12.
- [23] 卢一菲, 陈冲, 金成日, 等. 直驱永磁风电机组高电压穿越协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(15): 50-60.
LU Yifei, CHEN Chong, JIN Chengri, et al. HVRT coordinated control strategy of a direct-driven PMSG[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15): 50-60.
- [24] CHAN T F, LAI L L. An axial-flux permanent-magnet synchronous generator for a direct-coupled wind-turbine system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 86-94.
- [25] BHENDE C N, MISHRA S, MALLA S G. Permanent magnet synchronous generator-based standalone wind energy supply system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, 2(4): 361-373.
- [26] HASANOVA L. Compensation of reactive power of squirrel-cage asynchronous generators, used in wind power plants and small hydroelectric power stations[J]. *IFAC-Papers Online*, 2018, 51(30): 462-467.
- [27] SIGRIST L. A UFLS scheme for small isolated power systems using rate-of-change of frequency[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 30(4): 2192-2193.
- [28] LIU Y, JIANG L, WU Q H, et al. Frequency control of DFIG-based wind power penetrated power systems using switching angle controller and AGC[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(2): 1553-1567.

收稿日期: 2020-10-31; 修回日期: 2021-01-07

作者简介:

蔡葆锐(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与分析、电网规划等; E-mail: Cbaorui@sina.com

杨蕾(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制等; E-mail: 15911577929@139.com

黄伟(1979—), 男, 博士, 研究方向为电力系统运行与分析。E-mail: 783880@qq.com

(编辑 姜新丽)