

基于最大转子储能的风电场风机变利用率的有功功率分配策略优化

伍双喜^{1,2}, 谭嫣¹, 李宇骏², 张雨萌², 杨银国¹, 宁家鑫²

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 风机采用最大功率追踪控制时无功率备用, 当系统供需发生变化时, 易对系统稳定性造成较大影响。提出了一种风电场变利用率的有功功率分配策略, 在满足系统调度命令的同时, 减少风能的损失, 提高风能利用率。考虑到风场的尾流效应, 所提方案通过改变每台风力机的利用率来控制风机的有功功率输出。其中, 每台风力机的利用率根据其自身转速而自适应调整。当风机转速较高时, 风力机的利用率则较高。当风机转速较低时, 则降低风力机的利用率, 这样风电场可存储更多的旋转动能, 可在系统需要时释放回系统。通过在基于双馈风机的风电场中对所提变利用率策略进行研究, 结果表明, 在满足调度需求的同时, 所提控制策略比传统的等利用率方案更加节能。

关键词: 风电场; 变利用率; 双馈风机; 有功分配

Optimization of a variable utilization level scheme for load sharing control of a wind turbine in a wind farm based on maximum rotor energy storage

WU Shuangxi^{1,2}, TAN Yan¹, LI Yujun², ZHANG Yumeng², YANG Yinguo¹, NING Jiaxin²

(1. Electric Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Under Maximum Power Point Tracking (MPPT) control, the wind turbine has no power reserve, which tends to have a large impact on system stability when system supply and demand change. A variable utilization level (UL) scheme is proposed for a wind power plant (WPP) to fulfill the dispatch order while reducing the loss of wind energy and improving wind energy efficiency. Considering the weak effects of a wind farm, the proposed scheme controls the active power output for each wind turbine (WT) according to its utilization level (UL), which is adaptively adjusted according to WT rotor speed. When the turbine speed is higher, the wind turbine utilization level is higher; when the turbine speed is lower, the wind turbine utilization level is lower. Thereby the wind farm can store more rotational kinetic energy that can be released back into the system when needed. The proposed variable UL strategy is fully investigated in a doubly fed induction generator (DFIG)-based WPP and the results show that the proposed control strategy has better energy efficiency than the conventional equal UL while meeting the dispatch demand.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20198256).

Key words: wind power plant; variable utilization level; doubly fed induction generator; load sharing control

0 引言

近年来, 随着风电装机容量的持续增长, 电力

系统的安全可靠运行面临巨大挑战^[1-4]。当风力发电超过系统需求时, 变速风力机(Variable Speed Wind Turbines, VSWT)若仍采用最大功率点追踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制可能会导致电力系统的供需失衡^[5-7]。此时, 为保证系统中

的有功平衡, 传统同步发电机(Synchronous Generators, SGs)将运行在较低出力水平甚至关停一段时间, 这会导致同步发电机运行成本增加、同步发电机生命周期缩短等问题^[8]。

一种直接的解决方案是利用储能系统(Energy Storage System, ESS)来满足系统的调度需求^[9-13]。然而, 从技术和经济角度来看, 如飞轮和超级电容等储能能量较低, 在长期满足系统调度需求方面存在很大困难。此外, 考虑到充放电损耗高、安装投资高、生命周期短等缺点, ESS 技术也并不经济。因此, 有必要研究利用风力机自身能力来满足系统的调度需求。

实际上, 风电场(Wind Power Plant, WPP)可通过适当的功率分配控制, 调节每台风力机的出力, 可以满足系统间的功率平衡^[14-16]。具体而言, 当风电场的出力超出系统负荷时, 风力发电机可通过减载控制策略来降低有功功率输出^[17-20]。类似地, 当系统中负荷超出风机最大有功出力时, 可通过过载控制暂时性地抬升风电场出力以满足系统负荷需求^[21-24]。

有两种有功功率控制方案可实现风力发电机的减载或过载控制。第一种是通过桨距预留部分有功功率^[25-26]。然而, 该方案迫使风机偏离 MPPT 运行, 不可避免地造成大量的风能损失。此外, 桨距的响应速度相对较慢, 频繁启动桨距角控制可能会导致风力机应力疲劳。第二种广泛使用的方法是利用风机的旋转动能(Kinetic Energy, KE)^[22-23]。在减载控制中, 通过加速转子转速来保持其输出功率, 将部分风能转化为风力发电机的旋转动能。相反地, 在过载控制中可以通过降低转速将保留的动能释放出来。这种有功分配方法比基于桨距控制的方法风能利用率高。基于此优势, 本文进一步研究了基于动能的有功功率分配策略, 使风电场能够在较小风能生产损失的情况下完成电力调度命令。文献[27]中, 通过控制每台风机的利用率(Utilization Level, UL)相同, 提出了一种简单直接的有功功率分配策略。

本文相对于传统有功功率分配策略, 有以下创新点和不同:

- 1) 考虑风机之间尾流效应的影响, 根据不同风速进行风机自适应变利用率有功功率分配;
- 2) 统筹协调各风电机组, 减少等利用率策略的风能损失, 增加转子旋转动能的储存以提高能量利用率。

本文首先说明在传统的等利用率方案下, 风电场往往不够节能, 且较高风速下的风机可能比较低风速下的风机能量损失更多。由此, 本文在考虑风电场尾流效应下, 提出了一种风场变利用率有功功

率分配策略, 该策略统筹协调每台 DFIG, 进而减少总能量损失, 在节约风能的目标下, 对系统中风机进行变利用率策略控制, 进行有功功率的自适应分配, 对系统稳定性提供支撑。风电场中每台风机的利用率根据其转速进行自适应调整, 其中, 前排风机降低利用率, 后排风机提高利用率, 以便存储更多的旋转动能用以后续释放。本文所提策略在 DIgSILENT/PowerFactory 中得到了有效验证, 结果表明, 在满足调度需求下, 所提出的分配策略可以比传统的等利用率方案利用更多的风能。

1 风机模型及传统有功分配策略

1.1 风机模型及 MPPT 算法

从风中提取的机械功率 P_w 定义为

$$P_w = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) = g \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中: ρ 是空气密度(kg/m^3); R 是转子叶片半径(m); v_w 是风速(m/s); λ 是叶尖速比; β 是桨距角($^\circ$); C_p 是功率系数; g 是相关系数, $g = \rho \pi R^2 v_w^3 / 2$ 。

通常, 当 P_w 低于额定有功时, 桨距角设定为零。因此, C_p 仅是 λ 的函数, 且有最大值 $C_{p\text{m}}$ 。由于理论成熟, 直接给出输出功率公式^[28]如式(2)所示。

$$P_{\text{MPPT}} = \frac{\rho \pi R^5 k_g^3 C_{p\text{m}}}{2 \lambda^3} \cdot \omega_{\text{nop}}^3 = C_M \cdot \omega_{\text{nop}}^3 \quad (2)$$

式中: P_{MPPT} 是由 MPPT 算法确定的输出功率; k_g 是齿轮箱的传动比。式(2)是当 ω_n 在 0.7~1.2 p.u. 工作时 MPPT 曲线的表达式(图 1 中 BC 段)。当 ω_n 低于 0.7 p.u.(图 1 中 AB 段)时, P_{MPPT} 急速下降到零。当 ω_n 在 1.2~1.22 p.u. 时, P_{MPPT} 随 ω_n 线性增加到额定有功(图 1 中 CD 段)。最后由于桨距角控制作用限制到额定功率(图 1 中 DE 段)。

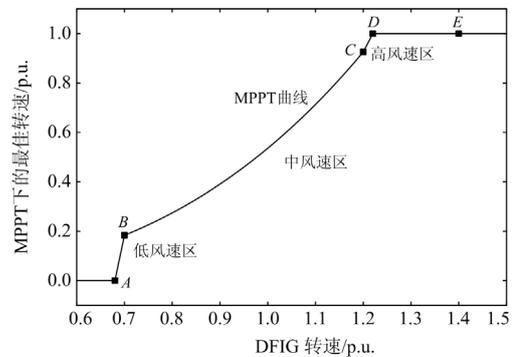


图 1 双馈风机最大功率点追踪曲线^[28]

Fig. 1 Maximum power point tracking curve of DFIG^[28]

1.2 尾流效应模型

在由多个 DFIG 组成的风电场中, 由于风机之间的尾流效应, 下游风机的有效风速低于上游风机。Park 模型是现有文献中的主流尾流模型之一^[29]。假设风速是线性扩展的, 如图 2 所示。对于任何风机 $i \in n$ (假设风电场中共有 n 台风机), 风速由式(3)给出。

$$V_i = V_0 \left(1 - 2 \sqrt{\sum_{j \in N: x_j < x_i} \left(a_j \left(\frac{D_j}{D_j + 2k(x_i - x_j)} \right)^2 \frac{A_{j \rightarrow i}^{\text{overlap}}}{A_i} \right)^2} \right) \quad (3)$$

式中: V_0 是自由风速; D_j 是风机 j 叶片的直径; A_i 是风机 i 的转子扫掠面积, 单位为 m^2 ; $A_{j \rightarrow i}^{\text{overlap}} / A_i$ 是风机 i 与 j 的重叠面积与扫掠面积之比; a_j 是风机 j 的轴向感应系数; x_j 是风机 j 的径向距离; k 是粗糙度系数, 不同环境下粗糙度系数不同。

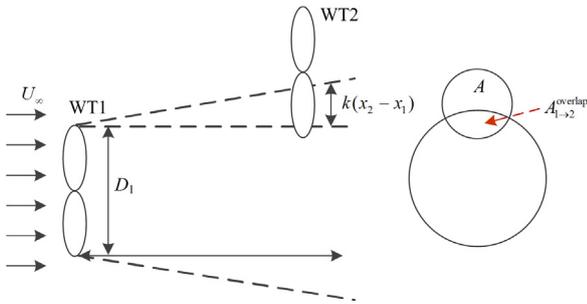


图 2 两台风机的尾流相互作用模型

Fig. 2 Wake interaction model between two wind turbines

1.3 基于等利用率的传统有功分配方案

为维持系统中的供需平衡, 要根据调度需求合理设置每台风电机组的参考发电量。下面介绍一种简单直接的方法: 所有风机设定相同利用率, 即根据每台 DFIG 的容量平均分配有功功率。

为说明各机组有功出力关系, 给出一个简易的微电网模型, 其风电场由多台 DFIG、一台同步发电机和若干本地负载组成, 如图 3 所示。SG 提供无功功率以维持电压并在低风速条件下产生额外的有功功率。风电场的总有功功率需求 P_d 可以表示为

$$P_d = \sum_{i=1}^m P_{L_i} - P_{SG} + P_{\text{loss}} \quad (4)$$

式中: m 是微电网中本地负载的数量; P_{L_i} 是根据本地负载计算的第 i 个本地需求; P_{SG} 是来自 SG 的有功功率; P_{loss} 是微电网中的有功功率损耗, 可以看作是 P_d 的一小部分。

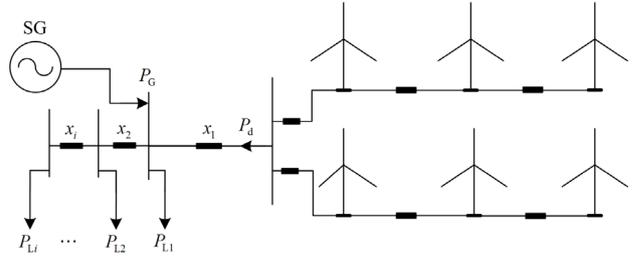


图 3 简易独立微电网模型

Fig. 3 Model of a simple stand-alone microgrid

如果忽略风电场之间的功率损耗, 则风电场的总可用发电量 (P_{wM}) 可以用式(5)计算。

$$P_{wM} = \sum_{i=1}^n P_{wmi} \quad (5)$$

式中: n 是风电场中 DFIG 的数量; P_{wmi} 表示第 i 个 DFIG 的预测最大风力发电量, 这取决于当前风速。设 P_d 为电网调度需求, 如果 P_d 大于 P_{wM} , 则所有 DFIG 都应在 MPPT 状态下运行。如果 P_d 小于 P_{wM} , 则需要一种合适的减载策略, 通过控制使 DFIG 的利用率 K 相同来实现供需平衡。

$$\begin{cases} K = \min \left\{ \frac{P_d}{P_{wM}}, 1 \right\} \\ P_{mi} = K \cdot P_{wmi} \end{cases} \quad (6)$$

式中, P_{mi} 为第 i 台 DFIG 的有功。上述等利用率方案可以保证单机微电网的供需平衡。风电场的实际风力发电量 P_{wpp} 可以表示为

$$P_{wpp} = \sum_{i=1}^n K \cdot P_{wmi} = \frac{P_d}{P_{wM}} \cdot \sum_{i=1}^n P_{wmi} = P_d \quad (7)$$

2 DFIG 不同减载策略的能量流分析

当可用风力发电量超过系统需求时, 应采用适当的减载策略代替传统的 MPPT 算法来应对系统的供需失衡。风电场中的 DFIG 可通过调节其利用率暂时减少其输出, 以满足系统调度需求。在高速度的风电场中, 前排 DFIG 启用基于桨距角的减载控制以实现有功功率分配。后排 DFIG 在低风速中采用基于动能的减载控制, 通过加速风机转子将风能转化为动能。本节将分析采用不同的减载控制进行有功功率分配时 DFIG 发电量的减少或损失, 以便说明基于等利用率的传统有功分配方案风能利用率较低, 并基于该能量流理论分析引出本文的优化策略。假设所有风机在系统需求变化之前都处于 MPPT 运行。

2.1 基于超速的减载控制

图4显示了基于超速的减载控制的动态过程。假设DFIG在中低风速(12 m/s)下工作在其最佳功率点A(图1中的AC段),当可用风能超过系统所需时,风速较低的风力机(后排DFIG)通过降低其利用率来减小输出。由于风电功率与风电机组输出功率之间的不平衡,DFIG开始加速并最终到达B点作为稳定点。假设DFIG在两个不同的利用率水平(图4中的B点和C点)下运行,两个减载点B和C的 E_{1i} 和 E_{2i} 的表达式可用式(8)计算。

$$\begin{cases} E_{1i} = (1 - K_B) \cdot P_A \cdot \Delta t \\ E_{2i} = -H_D \cdot (\omega_{n,B}^2 - \omega_{n,A}^2) \end{cases} \quad (K_i = K_B) \quad (8)$$

$$\begin{cases} E_{1i} = (1 - K_C) \cdot P_A \cdot \Delta t \\ E_{2i} = -H_D \cdot (\omega_{n,C}^2 - \omega_{n,A}^2) \end{cases} \quad (K_i = K_C)$$

式中: E_{1i} 和 E_{2i} 代表超速减载过程中有功功率和转子储能的变化; K_B 和 K_C 分别表示减载点B和C的风机利用率; H_D 代表风机的惯性时间常数; P_A 代表工作点A的有功功率; $\omega_{n,A}$ 、 $\omega_{n,B}$ 和 $\omega_{n,C}$ 代表工作点A、减载点B和C的风机转速。

显然,在基于超速的减载控制下,DFIG的利用率越低,其转子存储的动能就越多。

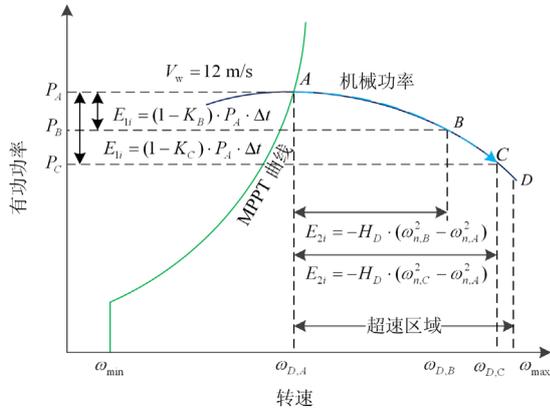


图4 超速控制策略示意图

Fig. 4 Illustration of the over-speeding control strategy

2.2 基于桨距角的减载控制

在高速区域(图1中CE段),前排DFIG将启用桨距角控制,将DFIG的输出功率限制为额定功率,DFIG转速高速阈值1.22 p.u.假设DFIG在E点运行,风速为15 m/s,达到转速的上限。依次要求风力机在 K_F 和 K_G 两种减载工况下运行,如图5所示。两种不同利用率的 E_{1j} 和 E_{2j} 表达式可用式(9)计算。

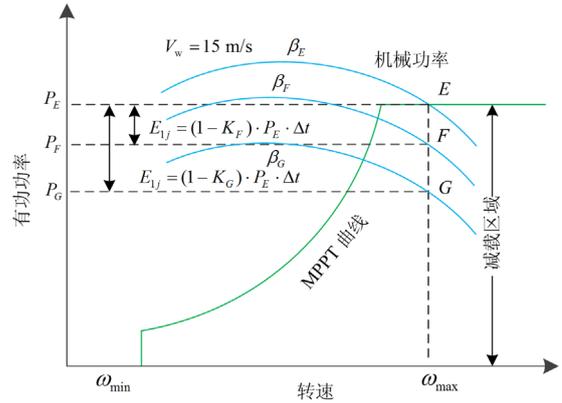


图5 桨距角控制策略图示

Fig. 5 Illustration of the pitch angle control strategy

$$\begin{cases} E_{1j} = (1 - K_F) \cdot P_E \cdot \Delta t \\ E_{2j} = 0 \end{cases} \quad (K_i = K_F) \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_{1j} = (1 - K_G) \cdot P_E \cdot \Delta t \\ E_{2j} = 0 \end{cases} \quad (K_i = K_G)$$

式中: E_{1j} 和 E_{2j} 代表基于桨距角减载过程中有功功率和转子储能的变化; K_F 和 K_G 分别表示减载点F和G的风机利用率; P_E 代表工作点E的有功功率;从式(9)可以看出,采用基于桨距角的减载控制,部分风能将浪费。且双馈风电机组的利用率越低,叶片变桨所浪费的风能就越多。

2.3 不同控制下的风电和能源分析

基于式(1)的风力发电机组实际捕获的风功率 P_{wi} 可以改写为

$$P_{wi} = \frac{\rho}{2} \pi R^2 v_w^3 C_p(\omega_{ni}, \beta) = g \cdot C_p(\omega_{ni}, \beta) \quad (10)$$

从式(10)可知, P_{wi} 与当前转速和风机的桨距角有关。这解释了通过超速控制或桨距角控制(增加桨距角)来使风力发电机的转子超速时,风机实际捕获的功率会降低。风力机中的能量平衡方程可表示为

$$E_{wi} = \int_{t_0}^t P_{wi} dt = \int_{t_0}^t P_{mi} dt + \int_{t_0}^t 2H_D \cdot \frac{d\omega_{ni}^2}{dt} dt = \quad (11)$$

$$E_{mi} + H_D \cdot (\omega_{ni}^2(t) - \omega_{ni}^2(t_0)) = E_{mi} + \Delta E_k$$

从式(11)可知,风机捕获的能量 E_{wi} 等于旋转质量的动能变化 ΔE_k 和传输到电网的风能 E_{mi} 之和。

两个减载控制的风力机在动态过程中输出功率相同。风电机组减载过程中桨距角控制与超速控制的主要区别在于风电机组的动能交替。前者直接削减风能,在减载控制时 ΔE_k 保持为零,而后者可以将部分风能作为动能保留。这很好地解释了基于桨距角的控制比基于超速的控制的动态过程中的总风

能损失更多。因此传统的等利用率方案不能更好发挥低速风机的超速控制的能力,为了节省更多风能,提高风能利用率,应提高桨距角控制的高速风机的利用率,减小其减载系数,而尽量减小超速控制的低速风机的减载系数,即提高其减载系数,即采用不同利用率的风机有功功率分配策略。

3 基于 DFIG 风电场变利用率有功分配策略

本文主要关注含多台 DFIG 的风电场的有功功率分配策略,以应对风力发电功率 P_{wm} 和调度需求 P_d 之间的功率不匹配。在传统的有功功率调度算法中,通过实现统一的利用率,可根据每台 DFIG 的输出功率确定每台风电机组的参考功率。考虑到风电场中的尾流效应,前排风机通过桨距角控制来降低出力会浪费大量风能。风速较低的后排风电机组可以通过加速其转速并将其存储为动能来保留部分风能。由于不同的减载控制浪费风能的量不同,采取等利用率方案不是最节能的。

为在完成调度命令的同时尽可能地利用风能,本文提出了一种风电场变利用率(减载系数)策略。此策略根据风机转速进行自适应利用率调整,即较高风速的风力发电机采用更高的利用率(较低的减载系数),使风电场浪费的风能更少。后排风机采用较低的利用率,将更多的风能转化为风机转子动能来降低输出功率。随后,减载控制中风电场中存储的动能可以通过过载策略释放回系统。

3.1 以 DFIG 的减载控制实现风电场的有功功率分配

为了在实现风力发电机组减载控制的同时存储更多动能,设置 DFIG 利用率的方法如下: α_i 为减载控制中第 i 台 DFIG 的减载系数,其与利用率 K_i 有关。

$$K_i = 1 - \alpha_i \quad (12)$$

减载系数 α_i 表示每台 DFIG 的减载水平。该值越大,DFIG 的利用率越低。实际上,目的不同,DFIG 的减载系数 α_i 也有很多种设置方法,例如也可以设置为与风机的转速成反比的线性或二次函数。为使减载控制期间每台风机的利用率之间的差异变大,下面介绍另一种方法。

ω_{nm} 为风电场中 DFIG 不能超过的最高转速,其值为 1.25 p.u.。DFIG 的当前转速与最高转速的差值可表示为

$$\Delta\omega_{ni} = \omega_{nm} - \omega_{ni} \quad (13)$$

α_i 被调整为与转速差 $\Delta\omega_{ni}$ 成线性关系,如式(14)所示。

$$\alpha_i \propto \Delta\omega_{ni} = \omega_{nm} - \omega_{ni} \quad (14)$$

式中,减载系数 $\alpha_i (i \in n)$ 根据定义的转速差 $\Delta\omega_{ni}$ 进

行自适应调整。高风速下前排 DFIG 采用更高的利用率(更低的减载系数)进行有功功率分配,从而浪费更少的风能。为实现式(14)中描述的线性关系,有

$$\frac{\alpha_i}{\omega_{nm} - \omega_{ni}} = \frac{\alpha_0}{\omega_{nm} - \omega_{n\max}} \quad (15)$$

式中: $\omega_{n\max}$ 是 DFIG 的最大转速,设置为 1.22 p.u.; α_0 是风机在最大转速下运行时 DFIG 的减载系数。 α_0 的选择基于有功平衡方程式(16)。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_{m_i} &= \sum_{i=1}^n K_i \cdot P_{w_{mi}} = \sum_{i=1}^n (1 - \alpha_i) \cdot P_{w_{mi}} = \\ & \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\alpha_0}{\omega_{nm} - \omega_{n\max}} \cdot (\omega_{nm} - \omega_{ni})\right) \cdot P_{w_{mi}} = P_d \end{aligned} \quad (16)$$

整理式(16),减载系数 α_0 可表示为

$$\alpha_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} - P_d\right) \cdot (\omega_{nm} - \omega_{n\max})}{\sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} \cdot (\omega_{nm} - \omega_{ni})} \quad (17)$$

风电场中采用减载控制进行有功功率分配时,每台 DFIG 对应的减载系数 α_i 和利用率 K_i 可以根据式(12)和式(15)计算。

$$\alpha_i = \alpha_0 \cdot \frac{\omega_{nm} - \omega_{ni}}{\omega_{nm} - \omega_{n\max}} \quad (18)$$

$$K_i = 1 - \alpha_i$$

每台 DFIG 的减载系数可写为

$$\alpha_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} - P_d\right) \cdot (\omega_{nm} - \omega_{ni})}{\sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} \cdot (\omega_{nm} - \omega_{ni})} \quad (19)$$

式(19)中 α_i 关于变量 ω_{nm} 的偏导可以写成

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i)}{\partial(\omega_{nm})} &= \\ & \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} - P_d\right) \cdot \left[\sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} (\omega_{nm} - \omega_{ni}) - (\omega_{nm} - \omega_{ni}) \sum_{i=1}^n P_{w_{mi}}\right]}{\left(\sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} \cdot (\omega_{nm} - \omega_{ni})\right)^2} \end{aligned} \quad (20)$$

定义函数 $G(\omega_{nm})$ 为

$$G(\omega_{nm}) = \sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} \cdot (\omega_{nm} - \omega_{ni}) - (\omega_{nm} - \omega_{ni}) \cdot \sum_{i=1}^n P_{w_{mi}} \quad (21)$$

显然,当风力机 i 为下游(后排 DFIG)时, $G(\omega_{nm})$ 为负,因为第 i 个风力机(下游风机)的转速 ω_{ni} 是 n

个风力机中最低的。因此, ω_{nm} 越低, 减载系数越高, 后排 DFIG 的利用率越低, 在减载控制期间, DFIG 可以存储更多动能。

3.2 以 DFIG 的过载控制实现风电场的有功功率分配

当系统过载时, 系统所需的电量可能会超过风电场可产生的最大功率。上述减载控制储存的动能可以通过过载控制释放回来。一种简单直接的方法是将系统调度需求与风机的最大发电量之间的功率差, 平均分配给 N 个低风速风机(第一组)。高风速风机(第二组)以额定功率运行。过载控制下每台低风速风机的参考功率可表示为

$$P_{mi}^{\text{ref}} = P_{wmi} + \left(P_d - \sum_{i=1}^n P_{wmi} \right) / N \quad (22)$$

为使风电机组在过载控制下稳定运行, 风电机组输出功率应为当前转速 MPPT 下输出功率参考值的最小值(图 6 中绿线)和过载控制下风电机组输出功率的参考值(图 6 中的蓝线), 表示为

$$P_{mi} = \min \left\{ P_{\text{MPPT},i}, P_{wmi} + \left(P_d - \sum_{i=1}^n P_{wmi} \right) / N \right\} \quad (23)$$

式(23)保证风机在释放所有储存的动能后可恢复到 MPPT 状态。否则, 风机容易达到最小转速限制并跳闸。整体控制策略如图 6 所示, 当系统发出的功率过多时, 风机会根据式(17)和式(18)从 MPPT 曲线的 A 点减载到 B 点, 以储存更多动能。过载时, 重新释放上述存储的动能, 基于式(22)和式(23), 工作点从 B 经 C 到 A 点。

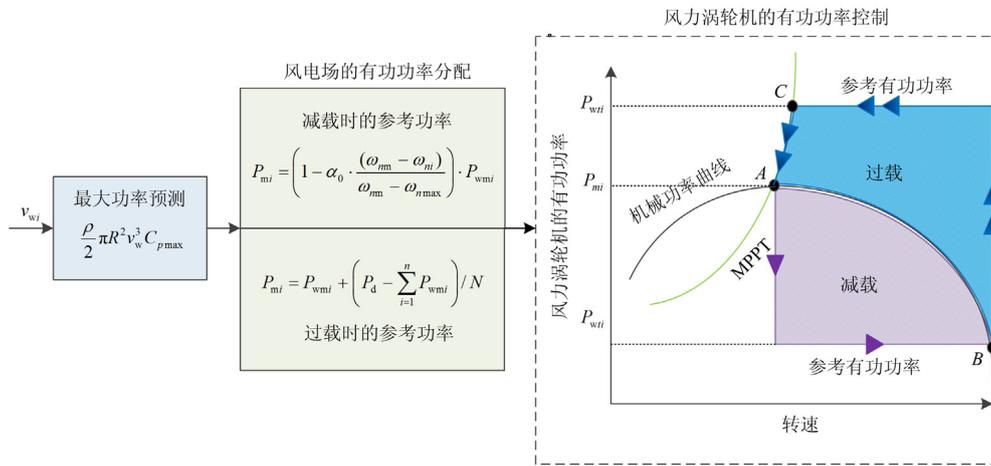


图 6 减载及过载状态下的风机动作方案

Fig. 6 Proposed scheme for WT under deloading and overloading status

本文中的过载控制可以理解成一种简单有效的将风力发电机储存的动能释放回系统的方法, 也是一种验证所提出的减载策略有效性的方法。若要更详细地考虑系统的动态特性(如系统受扰后的频率分布), 可能还有其他策略, 但这不是本文的重点。

4 算例分析

为研究所提出分配策略性能, 本文选取了包含一台传统的 SG、静态负载和基于 DFIG 的风电场的系统模型, 如图 7 所示。本文用 DIgSILENT/PowerFactory 进行仿真, 该软件是德国 DIgSILENT GmbH 公司开发的电力系统仿真软件。它以友好的图形化操作和崭新的数据管理观念为支撑, 提供了丰富的电力系统元件模型库, 并把机电暂态分析模型与电磁暂态分析模型结合到一起, 而其灵活可靠的自定义建模功能, 可以很好地处理诸如新能源或新设备并网时的仿真问题^[30-31]。由七阶的 30 MW

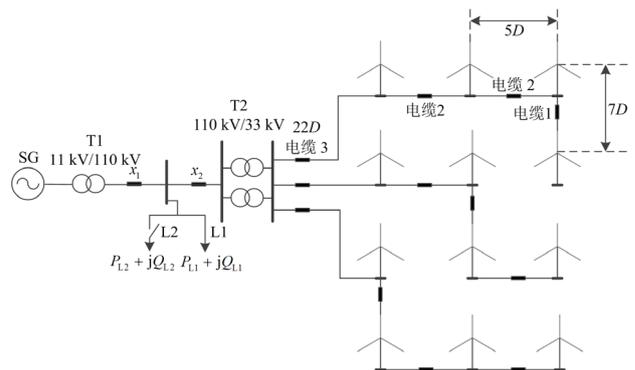


图 7 测试系统

Fig. 7 Test system configuration

SG 模型代表电网。SG 的主频率下垂控制设置为 4%。24 MW 的风电场由 12 台 2 MW 的 DFIG 组成。风电场的额定功率为总发电容量的 40%, 并且强制要求风电场通过有功功率分配控制来满足系统调度

需求。DFIG 模型及相关控制策略参考文献 [28,32-33]。每条支路连接 4 台 DFIG，3 条支路连接集电母线后通过变压器和电缆与电网相连。考虑到的尾流效应，两个相邻双馈风机的间距为 $5D$ ，其中 D 是双馈风机叶片的直径(56 m)。如图 7 所示的风电场之间的电缆长度分别为 $7D$ 、 $5D$ 、 $22D$ 。电网包含两个本地负载(L1&L2)。L1 为一个固定负载 $P_{L1} + jQ_{L1}$ ，大小为 $26 \text{ MW} + 4 \text{ Mvar}$ ，另一个负载 L2 有开关相连，标记为 $P_{L2} + jQ_{L2}$ 。调度指令每 100 s 更改一次。

4.1 风速为 14 m/s 的风电场中的减载控制

如表 1 所示，风机的有效风速是通过式(3)中描述的模型计算的。扰动前 DFIG 的转速由式(2)中的 MPPT 算法确定。在相同的利用率方案中， K 为 0.865 2。在本文提出的变利用率方案中，基于式(27)和式(28)计算的初始变利用率 K_i 分别为 0.957、0.792 2 和 0.739 8。显然，与低风速下的 DFIG 相比，高风速下的 DFIG 具有更高的利用率。风电场的最大发电量为 $14.98 \text{ MW}(0.624 3 \text{ p.u.})$ 。

表 1 高风速下风速、转速、DFIG 预测最大功率、利用率
Table 1 Wind, rotor speeds, predicted maximum power of DFIG, and UL (high wind condition)

	Col.1	Col.2	Col.3
风速/(m/s)	14	11.34	10.50
转速/p.u.	1.191 1	0.965 6	0.893 9
$P_{mi}/p.u.$	0.957 9	0.510 3	0.405 0
P_{wm}/P_d	0.624 3 p.u./0.540 2 p.u.		
等 UL	0.865 2	0.865 2	0.865 2
变 UL	0.957	0.792 2	0.739 8

$P_{L2} + jQ_{L2}$ 取 $2 \text{ MW} + 0 \text{ Mvar}$ ，开关在 $t = 50 \text{ s}$ 时断开。由于轻载条件下风力资源富余，DFIG 开始减载至 $12.96 \text{ MW}(0.540 2 \text{ p.u.})$ 。表 2 将变利用率策略和常规控制方案的仿真结果进行了比较。从表 2 可以看出，在本文提出的变利用率策略下，DFIG1 的桨距角小于传统控制的桨距角，多余的能量输入到系统中，而 DFIG2 和 DFIG3 的转速大幅提高，进行超速的减载控制，结合第 3 节基于超速减载控制的分析，后排风机的转速增加以储存多余能量，同时自身利用率降低，输出功率降低以达到减载目的，本质上是传统控制中前排风机本会浪费的风能储存在后排风机转子转动动能中。多余的能量可以暂时存储在后排 DFIG 中，并在之后系统需要时释放回来。变利用率策略在风电场中存储的动能约为 7.22 p.u. ，等利用率方案储存动能接近 6.81 p.u. ，增加储存动能 6%。有效验证了变利用率策略的优势。

表 2 高风速下变利用率策略和常规控制方案仿真结果对比
Table 2 Simulation results with variable utilization level scheme and conventional control strategy within a WPP (high wind condition)

	变利用率策略			常规控制方案		
	P_{Gi}	ω_{hi}	β	P_{Gi}	ω_{hi}	β
DFIG1	0.867 4	1.220 0	1.60	0.828 8	1.22	2.34
DFIG2	0.434 2	1.202 6	0	0.441 5	1.18	0
DFIG3	0.319 1	1.182 6	0	0.350 4	1.098	0
存储动能	7.22 p.u.			6.81 p.u.		

图 8 和图 9 比较了 3 种不同情况，即没有任何额外控制、传统方案和本文提出的变利用率策略。在本文提出的变利用率策略中，前排双馈风机(DFIG1)的利用率高于后排双馈风机(DFIG3)，即 DFIG3 的转速增幅比 DFIG1 更高，因为增幅较大，因此增加到预设转速的时间更长，如图 8 所示。本文提出的变利用率策略中，DFIG1 的利用率较高，DFIG1 的转速增加比传统方案慢。从图 9(a)可以看出，风电场将其输出功率降低到与需求平衡，使系统频率在负荷变化期间保持稳定，MPPT 控制由于无减载控制，因此各风机出力不变。对比传统等利用率(蓝色曲线)和本文所提变利用率控制策略(红色曲线)，本文所提策略中，DFIG1 出力较多，DFIG2 和 DFIG3 出力较少，而更多将能量储存为转动动能，但总体出力与等利用率策略相同。如图 9(b)所示。相比之下，MPPT 控制 DFIG 的风电场中，只有 SG 承担系统中功率调整，且系统频率在负荷突降时快速增加，从而导致变利用率策略的桨距角控制启用时间滞后于等利用率方案，如图 9(c)所示。

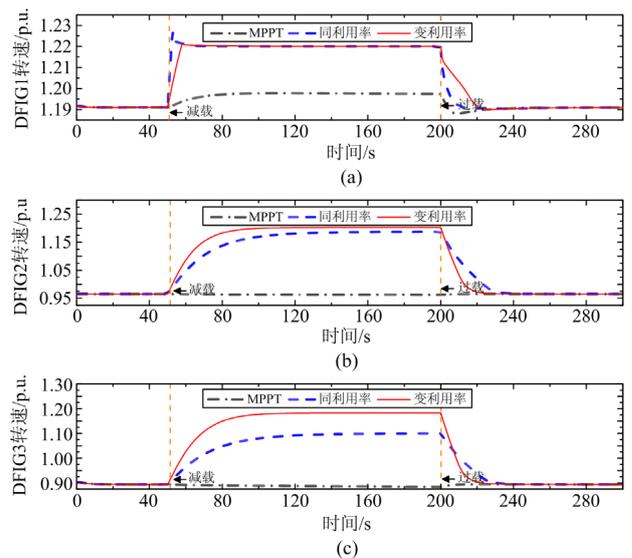


图 8 三组 DFIG 转速仿真结果

Fig. 8 Simulation results for three DFIGs rotor speed

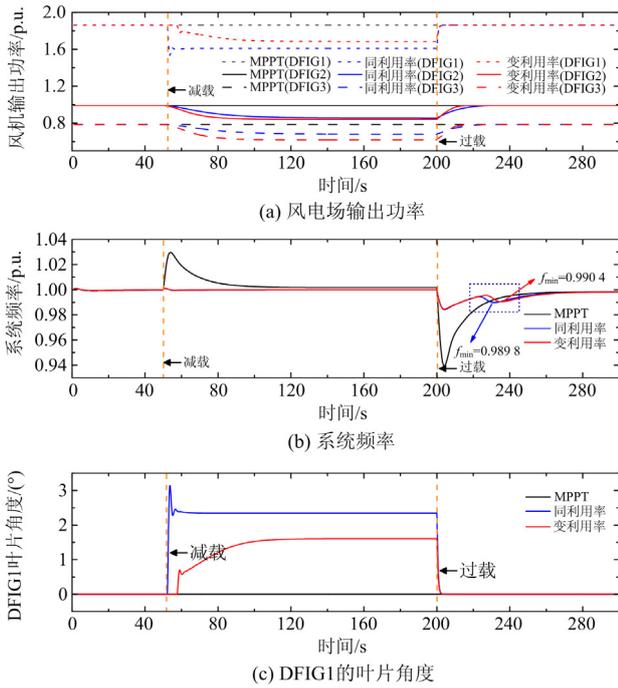


图9 双馈风机3种案例仿真结果

Fig. 9 Simulation results for three rotor speed cases of DFIGs

4.2 风速为 14 m/s 的风电场中的过载控制

$P_{L2} + jQ_{L2}$ 取 2 MW + 0 Mvar, 开关在 $t = 200$ s 时闭合, 之后 DFIG 发生过载至有功输出为 15.88 MW (0.662 p.u.)。图 9 显示了负载突然变化后 DFIG 和 SG 的动态响应。本文中变利用率策略 DFIG 的过载时间比采用传统控制方案时要长, 从图 9(b) 可以清楚地看出, 若采用本文提出的变利用率策略, 系统频率下降为 0.9904 p.u., 大于传统的控制方案下的 0.9898 p.u.。图 9 中, 频率下降的轻微改善是由于风机中存储少量的动能。由于后排双馈风机 (DFIG3) 在减载控制中的转速大于常规控制, 过载控制中释放存储在 DFIG3 中的旋转动能的时间比等利用率方案长, 如图 8 所示。对于前排双馈风机 (DFIG1), 两种控制方案中储存的能量是相同的, 因此两种控制方式将能量释放回系统的动态过程几乎相同。本文提出的变利用率策略中后排 DFIG 可以释放更多的动能, 仿真验证了该方案的节能优势, 也在一定程度上改善了系统动态行为。

4.3 参数 ω_{mm} 的影响

ω_{mm} 定义为风电场中 DFIG 的最高转速。表 3 反映了参数 ω_{mm} 对所提出的控制方案性能的影响。有效地验证了本文提出的策略中, 较低的 ω_{mm} 下, 风力发电机的初始利用率偏差较大。减载控制中, ω_{mm} 较小时, DFIG 3 的功率参考值也较小, 这使得 ω_{mm} 较小时的风力发电机转速高于 ω_{mm} 值较高的情

况。因此, 具有较低 ω_{mm} 的风电场中存储的动能大约为 7.35 p.u., 具有较高 ω_{mm} 的储存动能接近 7.22 p.u.。这有效地验证了 ω_{mm} 越低, 后排 DFIG 的利用率将越小。由于本文提出的策略可以释放更多的动能以支持较低的 ω_{mm} 系统, 系统频率下降也略有改善。

表 3 建议控制方案的不同 ω_{mm} 结果Table 3 Results with different ω_{mm} for the proposed control scheme

	$\omega_{mm} = 1.23$			$\omega_{mm} = 1.25$		
	DFIG1	DFIG2	DFIG3	DFIG1	DFIG2	DFIG3
初始 UL	0.968 1	0.783 5	0.724 8	0.957	0.792 2	0.739 8
P_{Gi}	0.877 6	0.430 2	0.312 8	0.867 4	0.434 2	0.319 1
D_i	1.220 0	1.211 3	1.202 9	1.220 0	1.202 6	1.182 6
β	1.412	0	0	1.60	0	0
储存动能	7.35 p.u.			7.22 p.u.		
f_{min}	0.990 7 p.u.			0.990 4 p.u.		

5 结论

为满足电力系统功率供需平衡及调度需求, 并提高风能利用率, 本文提出了一种基于 DFIG 的风场变利用率的有功功率分配策略, 减少有功功率分配导致的风能损失。该策略根据每台风力发电机的转速自适应地调整其利用率, 以便存储更多的动能, 并在系统需要时释放回来。在本文算例中, 该变利用率策略比传统策略增加储存动能 6%。仿真结果表明, 与传统等利用率方案相比, 所提出的方案可统筹协调各风机, 增加转子旋转动能的储存以提高能量利用率, 减少总能量的损失, 更加节能。随着未来风电渗透率的提高, 风场变利用率的有功功率分配策略有很高的实际工业应用价值。

参考文献

- [1] 王同森, 程雪坤. 计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 29-36.
WANG Tongsen, CHENG Xuekun. Variable droop coefficient control strategy of a DFIG considering rotor speed limit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 29-36.
- [2] 杨蕾, 王智超, 周鑫, 等. 大规模双馈风电机组并网频率稳定控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 186-194.
YANG Lei, WANG Zhichao, ZHOU Xin, et al. Frequency stability control strategy for large-scale grid connections with DFIG units[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 186-194.
- [3] YAN C, TANG Y, DAI J, et al. Uncertainty modeling of

- wind power frequency regulation potential considering distributed characteristics of forecast errors[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(3): 276-288.
- [4] 金晨, 任大伟, 肖晋宇, 等. 支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划[J]. *中国电力*, 2021, 54(8): 164-174.
- JIN Chen, REN Dawei, XIAO Jinyu, et al. Optimization planning on power system supply-grid-storage flexibility resource for supporting the “carbon neutrality” target of China[J]. *Electric Power*, 2021, 54(8): 164-174.
- [5] LI Y, XU Z, MENG K. Optimal power sharing control of wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(1): 824-825.
- [6] 崔红芬, 王德顺, 杨波, 等. 支撑电网黑启动的风光储新能源电站协调控制策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(9): 50-57.
- CUI Hongfen, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Coordinated control strategy of wind-solar-storage power stations supporting black start of power grid[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(9): 50-57.
- [7] 孙志辉, 郝万君, 尚友涛, 等. 基于自适应非奇异快速终端滑模的风力发电机最大功率跟踪控制[J]. *热力发电*, 2020, 49(1): 48-54.
- SUN Zhihui, HAO Wanjun, SHANG Youtao, et al. MPPT control of wind turbine based on self-adaptive nonsingular fast terminal sliding mode[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(1): 48-54.
- [8] VYVER J, KOONING J, MEERSMAN B, et al. Droop control as an alternative inertial response strategy for the synthetic inertia on wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1129-1138.
- [9] 李浩博, 邹海荣, 朱建红. 考虑风电计划跟踪的储能调度模糊控制系统研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 125-132.
- LI Haobo, ZOU Hairong, ZHU Jianhong. Research on a fuzzy control system of energy storage dispatch considering wind power plan tracking[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 125-132.
- [10] 余豪杰, 李官军, 杨波, 等. 基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动调控技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(3): 48-56.
- YU Haojie, LI Guanjun, YANG Bo, et al. Research on the active control technology of grid voltage based on a distributed photovoltaic/flywheel energy storage combined generation system[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(3): 48-56.
- [11] 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.
- [12] 王苏蓬, 张新慧, 吴文浩, 等. 用于风电平抑的混合储能选型和容量优化配置方法[J]. *智慧电力*, 2021, 49(9): 16-23.
- WANG Supeng, ZHANG Xinhui, WU Wenhao, et al. Hybrid energy storage selection and capacity optimization configuration method for wind power smoothing[J]. *Smart Power*, 2021, 49(9): 16-23.
- [13] 李军徽, 高卓, 李翠萍, 等. 基于动态任务系数的储能辅助风电一次调频控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(19): 52-59.
- LI Junhui, GAO Zhuo, LI Cuiping, et al. Control strategy for dynamic task coefficient based primary frequency regulation of wind power assisted by energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 52-59.
- [14] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(21): 157-169.
- ZHAO Jiaying, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(21): 157-169.
- [15] 张真源, 刘国荣, 刘科正, 等. 风电场采用健康系数与变下垂输出系统参与电网调频研究[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(3): 97-106.
- ZHANG Zhenyuan, LIU Guorong, LIU Kezheng, et al. Research on wind farm standby power participating in power grid frequency modulation based on load shedding control[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(3): 97-106.
- [16] 付菊霞, 陈洁, 邓浩, 等. 平抑风电波动的混合储能系统控制策略[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(5): 94-100.
- FU Juxia, CHEN Jie, DENG Hao, et al. Control strategy of hybrid energy storage system for mitigating wind power fluctuations[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(5): 94-100.
- [17] VIDYANANDAN K, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 837-846.
- [18] ALMEIDA R, PECAS J. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(3): 944-950.
- [19] MOUTIS P, LOUKARAKIS E, PAPATHANASIOU S, et al. Primary load-frequency control from pitch-controlled wind turbines[C] // 2009 IEEE Bucharest PowerTech,

- June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania: 1-7.
- [20] 王天翔, 程雪坤, 李伟超, 等. 基于变参数减载控制的风电场一次调频策略[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 94-101.
WANG Tianxiang, CHENG Xuekun, LI Weichao, et al. Primary frequency control strategy of wind farm based on variable parameter control[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 94-101.
- [21] LE-REN C, WEI L, YAO Y. Enhancing frequency response control by dfigs in the high wind penetrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 710-718.
- [22] LI Y, XU Z, WONG K. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3027-3037.
- [23] YE H, PEI W, QI Z. Analytical modeling of inertial and droop responses from a wind farm for short-term frequency regulation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3414-3423.
- [24] 陈永华, 唐冠军, 宋晓芳, 等. 考虑风电特性的送出线路过载控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 75-80.
CHEN Yonghua, TANG Guanjun, SONG Xiaofang, et al. Overload control method of transmission lines considering wind power characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 75-80.
- [25] KAMEL R, CHAOUACHI A, NAGASAKA K. Three control strategies to improve the microgrid transient dynamic response during isolated mode: a comparative study[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1314-1322.
- [26] LIU H, 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.
- [27] ZHANG W, XU Y, LIU W, et al. Fully distributed coordination of multiple DFIGs in a microgrid for load sharing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 806-815.
- [28] YANG L, XU Z, OSTERGAARD J, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 713-722.
- [29] MARDEN J, RUBEN S, PAO L. Model-free approach to wind farm control using game theoretic methods[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1207-1214.
- [30] 董炜, 潘秋萍, 雷金勇, 等. BPA与DIgSILENT动态模型的比较与数据转换[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 140-146.
DONG Wei, PAN Qiuping, LEI Jinyong, et al. Comparison and data conversion between dynamic models of BPA and DIgSILENT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 140-146.
- [31] 杨再欣, 陶军, 尹柏清, 等. 基于DIgSILENT的机网协调控制及动模验证[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 180-187.
YANG Zaixin, TAO Jun, YIN Baiqing, et al. Generator and power grid coordination control and dynamic test based on DIgSILENT[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 180-187.
- [32] XIE D, XU Z, YANG L, et al. A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3302-3310.
- [33] WAN C, XU Z, PINSON P. Direct interval forecasting of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4877-4878.

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2022-03-01

作者简介:

伍双喜(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、新能源并网管理; E-mail: wusx03@163.com

谭 嫣(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网管理; E-mail: 179513428@qq.com

李宇骏(1990—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为风电场对系统提供惯量和频率支撑的控制策略。E-mail: yujunli@xjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)