

[控制策略]

双层控制策略下风电场频率响应与机械载荷协同优化

文/李明达
大庆油田有限责任公司新能源研究开发分公司

提出风电场层频率协调控制策略和机组层载荷控制策略，包括一次调频控制、频率协调分配以及基于转矩补偿的传动轴扭振控制和基于带阻滤波器的塔架振动控制。利用 Simwindfarm 构建风电场模拟模型进行算例分析，结果表明协调控制策略能有效提升系统频率最低水平，优于无频率调节和传统比例控制策略，为风电场的优化运行提供有效方案。

随着新能源战略的深入实施，风电作为清洁能源的重要组成部分，其装机容量和发电量逐年增长。电力系统的频率稳定性是衡量系统运行质量的重要指标，风电场的并网运行对系统频率产生了一定影响。在负荷扰动时，风电场的频率响应特性直接关系到系统的稳定性和供电质量。传统的风电场控制策略在频率调节方面存在一定的局限性，无法充分发挥风电场的调频潜力。此外，风电场在参与频率调节过程中，机组承受的额外机械载荷可能导致设备寿命缩短，甚至引发安全事故。针对上述问题，本文从风电场层和风电机组层两个层面出发，提出双层控制策略，提升风电场参与电网频率调节的能力。

含风电的电力系统频率响应特性

1. 含风电的电力系统频率响应模型

由于风电场设备众多，直接构建模型会大幅增加复杂度与维度，因此采用等效聚合技术简化模型结构。电网频率响应主要包括惯量响应与一次频率调整，惯量响应阶段，同步发电机可自动调整有功输出，为系统提供惯量支撑，其惯量参数表达式为

$$H_w = \frac{J_w}{2\rho_w^2 P_{rate}} (\omega_{r0}^2 - \omega_{r-min}^2) \quad (1)$$

式中， ρ_w 为风电机组发电极对数； ω_{r0} 为发电机初始转速； ω_{r-min} 为发电机转速下限； P_{rate} 为额定功率。

以火电与风电混合的电网为例，设火电机组有 m 台，风机有 n 台，该电网等效惯量时间常数特定表达式为

$$H_{sys} = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{J_{g,j} \omega_g^2}{2\rho_{g,j}^2} + \sum_{j=1}^n \frac{J_{w,j} (\omega_{r,i,t}^2 - \omega_{r-min}^2)}{2\rho_{w,i}^2}}{\sum_{j=1}^m S_{g-rate,j} + \sum_{i=1}^n P_{rate,i}} \quad (2)$$

频率调整过程中，火电机组通过调速系统调节功率输出，其动态行为可简化为一阶系统模型

$$\Delta P_g = \frac{-K_g}{1 + T_G s} \Delta f \quad (3)$$

式中， K_g 为调速器增益； T_G 为时间常数。

图1所示为电网频率响应模型，平衡状态下发电量与负荷消耗量相等。若负荷突增导致频率降低，风电场与火电机组将共同参与频率调节。该模型为多机系统模型，可简化为单机模型。火电机组与风电机组的频率调节特性受调速系统时间常数和增益等因素影响。

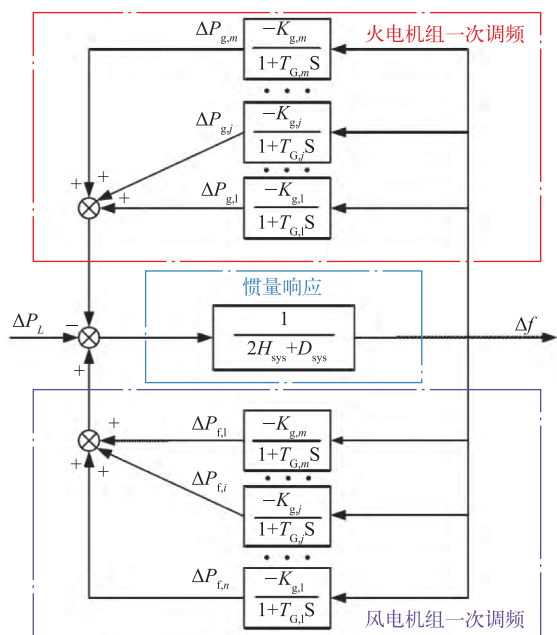


图1 电力系统频率响应模型

2. 风电对系统频率的影响

系统负荷扰动时的最大频率偏差是评价频率稳定性的重要标准，受系统惯性和一次调频能力共同作用。在火电机组调速器增益保持不变时，系统最大频率偏差受风电场等效惯量及风机调速器增益影响。等效转速和调速器增益的提高与最大频率偏差成反比，即转速和增益越高，最大频率偏差越小。

稳态频率偏差是指系统调频动作完成后实际频率与额定频率之间的差距，是衡量频率稳定性的核心指标。偏差越大，系统稳定性越差。系统稳态频率偏差主要受风电场调速器等等效增益影响，调速器增益增加有助于减小稳态频率偏差，从而提高系统频率稳定性，增强调频效果。

风电场层频率协调控制策略

如图2所示为风电场进行频率调节的控制框架，该框架应用复合惯量控制，赋予系统惯量响应和一次调频能力。然后，风电场的频率协调控制系统将基于各调频机组的备用容量、转速等指标，评估其调频可能性，进而确定每台机组的调频功率，并将这些功率指令分发给相应的风电机组。

1. 风电场一次调频控制策略

在风电场运营管理层面，通过实施全面的惯量

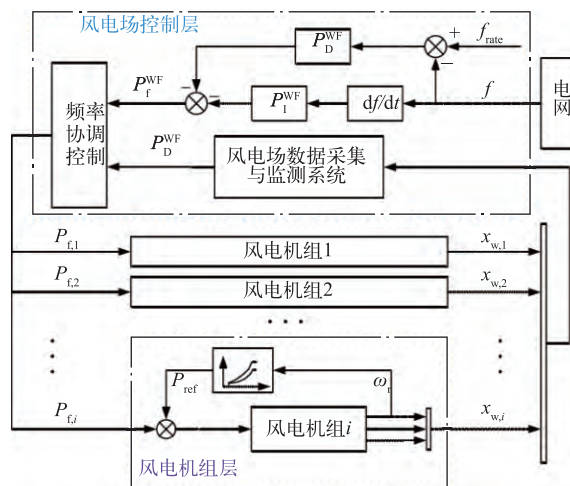


图2 风电场调频控制结构图

控制策略，计算风电场整体调频功率

$$P_f^{WF} = -K_I^{WF} \frac{df}{dt} - K_D^{WF} \Delta f \quad (4)$$

式中，\$K_I^{WF}\$ 为虚拟惯量系数；\$K_D^{WF}\$ 为下垂系数。

采用固定调频参数进行综合惯量控制时，由于忽略了不同机组间的状态异质性，可能会限制调频资源的有效利用。因此，需要根据风电场中各个机组的实际运行状况，动态调整虚拟惯量参数和下垂参数。风电场的等效惯量以及一次调频效能与机组转速及其调节性能紧密相关，为此引入惯量指标 \$Q_I^{WF}\$ 和一次调频指标 \$Q_D^{WF}\$。

$$Q_I^{WF} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (\omega_{r,i}^2(t) - \omega_{r-\min}^2)}{n_1 \cdot (\omega_{r-\max}^2 - \omega_{r-\min}^2)} \quad (5)$$

$$Q_D^{WF} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (P_{e-\max,i} - P_{e,i}(t))}{n_1 \cdot (P_{e-\max,i} - P_{e-\min,i})} \quad (6)$$

式中，\$P_{e-\max,i}\$、\$P_{e-\min,i}\$ 为风电机组输出功率最大值和最小值。

\$Q_I^{WF}\$、\$Q_D^{WF}\$ 两个指标分别表征了在调频过程中，风电场中机组的转速变化和调节功率与初始状态的差异。\$Q_I^{WF}\$、\$Q_D^{WF}\$ 的数值为0~1，其变化与风电场的惯量水平和调节性能的变动一致，因此可利用这两个指标实时调整虚拟惯量参数和下垂参数

$$\begin{cases} K_I^{WF} = K_{I_0}^{WF} Q_I^{WF} \\ K_D^{WF} = K_{D_0}^{WF} Q_D^{WF} \end{cases} \quad (7)$$

式中，\$K_{I_0}^{WF}\$ 为虚拟惯量系数；\$K_{D_0}^{WF}\$ 为下垂系数。

2. 风电场频率协调分配策略

构建评价模型，该模型根据风电机组运行状况，计算出参与频率调节的综合评价系数，并据此进行调频功率分配。风电机组调频表现受其转速、调频能力和风速等因素影响，构建相应的性能评价指标，包括转速指标、调频能力指标和风速指标，公式为

$$\begin{cases} x_{\omega,i} = \frac{\omega_{r,i}^2 - \omega_{r,\min}^2}{\omega_{r,\max}^2 - \omega_{r,\min}^2} \\ x_{pe,i} = \frac{P_{e-\max,i} - P_{e,i}}{P_{e-\max,i}} \\ x_{v,i} = \frac{v_i - v_{\text{cut}}}{v_{\text{cutout}} - v_{\text{cut}}} \end{cases} \quad (8)$$

式中， $x_{\omega,i}$ 为转速指标； $x_{pe,i}$ 为调频容量指标； $x_{v,i}$ 为风速指标。

获取风电机组运行状态指标后，需要对这些指标进行全面评价。设 $x_{w,i}$ 和 $w_{w,i}$ 分别为风电机组的各项指标及其相应权重。利用这些信息，可计算出风电机组的频率调节综合评价系数 $\chi_{w,i}$

$$\chi_{w,i} = x_{w,i} w_{w,i}^T \quad (9)$$

为使调频功率分配与机组综合评价系数相吻合，以最大化调频资源应用效率，参与调频的风电机组应按照其综合评价系数的比例接收调频功率指令，遵循以下关系

$$\frac{P_{f,1}}{\chi_{w,1}} = \frac{P_{f,2}}{\chi_{w,2}} = \dots = \frac{P_{f,i}}{\chi_{w,i}} = \dots = \frac{P_{f,n_i}}{\chi_{w,n_i}} \quad (10)$$

式中， $P_{f,i}$ 为风电机组调频功率指令。

风电机组层载荷控制策略

1. 基于转矩补偿的传动轴扭振控制

电磁转矩波动会导致风力发电机传动系统中的机械转矩与电磁转矩不一致，进而引发传动轴的扭转振动。风力发电机的机械转矩和电磁转矩的变动均会引起传动轴的扭振，从而增大扭矩。在风力发电机进行频率调节时，电磁转矩的迅速变化可能会引起传动轴的扭振。

为减轻风力发电机在频率调节过程中引起的轴系扭振，基于转矩调整的扭振抑制技术，以风轮与发电机角速度的差值作为转矩补偿控制的输入信号，通过控制器计算转矩补偿量，并将此补偿量加至电磁转矩上，以形成调整后的电磁转矩参考值。

2. 基于带阻滤波器的塔架振动控制

当风机参与频率调节时，通过释放风轮的旋转动能提供有功功率，可能引起风轮转速不稳定。因此，采用带通滤波器对风轮转速数据进行处理，可消除与塔架固有频率相关的干扰，防止发生共振。带通滤波器的二阶传递函数形式为

$$G_{\text{BSF}}(S) = \frac{S^2 + 2\xi_1\omega_{n1}S + \omega_{n1}^2}{S^2 + 2\xi_2\omega_{n2}S + \omega_{n2}^2} \quad (11)$$

式中， ω_n 为共振频率； ξ_1 为带通滤波器分子； ξ_2 为分母阻尼比。

带通滤波器的中心频率应与塔架的固有频率匹配，以有效过滤接近塔架固有频率的信号。带通滤波器的阻带范围较窄，使大部分信号能够通过，仅在信号频率接近塔架固有频率时进行筛选，从而有效地降低塔架的振动。

算例分析

为检验本研究提出的风电场双层频率调节策略的有效性，利用Simwindfarm构建风电场模拟模型。该模型由60台机组组成，每两台相邻风机的横向和纵向距离均为500 m。为提高能量产出效率，选取前30台机组参与电网频率调整。模拟实验持续200 s，期间风速在10~16 m/s之间波动，并于第30 s时突然加入100 MW负载。为比较本策略的优势，进行三种不同控制策略的仿真测试：无频率调节策略、传统比例控制策略以及本研究提出的协调控制策略。在无频率调节模式下，风电场不参与电网频率调整；而在传统比例控制策略下，风电场控制器采用下垂控制，各风机根据其容量比例分担调频任务。

在仿真实验进行到第30 s时，负载突然增加0.2 pu，不同控制策略下系统频率和风电场总功率输出的仿真数据变化如图3所示。

未实施频率控制措施时，系统频率的最低点下降最为显著。而采用传统比例控制或协调控制策略，均能在频率下降期间为系统提供稳定性支持，有效提升频率最低点。在传统比例控制模式下，风机仅根据其容量贡献有功功率，未能充分发挥风电场的调频能力，与本研究策略相比，其贡献的有功功率相对较少。协调控制策略能够向系统注入更多的有功功率，从而显著提升系统频率的最低水平。

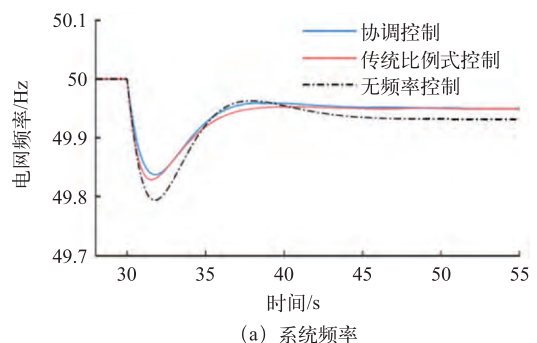
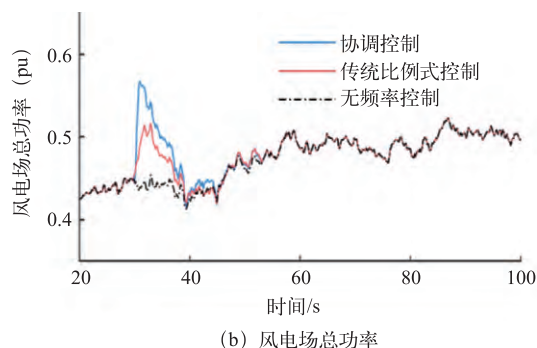


图3 系统频率和风电场总功率仿真结果

结束语

本文提出的双层控制策略,包括风电场层频率协调控制策略和风电机组层载荷控制策略,能提升风电场参与电网频率调节的能力,显著提高系统频率稳定性。与传统比例控制策略相比,本文提出的协调控制策略能更好地发挥风电场的调频潜力,向

系统注入更多的有功功率,从而有效减轻系统频率下降。同时,通过实施有效的载荷控制策略,降低风电机组在频率调节过程中承受的额外机械负担,提高风电场的运行安全性。总体而言,本文的研究为风电场参与电网频率调节提供理论依据和技术支持,有助于推动风电场的稳定运行和电网的可靠供电。EA

(收稿日期:2024-11-26)

参考文献

- [1] 张龙,孙丹,马志豪,等.海上风电柔直送出系统改进频率协同控制策略[J].太阳能学报,2024,45(10):478-486.
- [2] 刘士名.基于风电场-储能系统的频率联合控制研究[J].能源与节能,2024(10):80-83.
- [3] 俞靖一,葛俊,杨铎炯,等.基于转子动能的风电场自适应频率主动支撑控制策略[J].电力工程技术,2024,43(5):131-139.
- [4] 王育飞,张文韬,杨铭诚,等.考虑虚拟控制参数调节的风储联合调频优化模型预测控制[J].电力系统保护与控制,2024,52(16):37-48.
- [5] 刘鸿清,张秀琦,王立强,等.新能源场站惯量支撑与频率响应特性研究[J].内蒙古电力技术,2024,42(4):14-22.

