

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.023

基于耗散功率转归分量的风电系统有功实时调度

钟 浩^{1,2}, 周 倩¹, 张春阳¹, 李咸善¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对风速的随机性和间歇性给大规模风电并网电力系统的在线实时调度带来的困难,文中提出了一种基于耗散功率转归分量的含风电场电力系统有功实时调度方法。利用耗散功率分量理论推导出风电机组、常规机组与负荷之间的响应关系,从而计算出负荷功率对发电机出力的灵敏度,根据灵敏度信息确定实时调度中参与调整的常规机组的功率调整因子,以及时补偿风电输出波动而产生的功率过剩或缺额;并在一个在线调度周期内,利用机组与负荷之间的响应关系建立了以系统总有功网损最小为目标,计及线路阻塞管理以及风电场有功和无功功率关系约束的实时优化调度模型。最后利用接有风电场的IEEE9节点和IEEE30节点系统对文中所提模型进行仿真分析,仿真结果验证了所提方法的合理性和正确性。

关键词: 耗散功率分量; 响应关系; 灵敏度; 功率波动; 实时调度

Active Power Real-time Scheduling of Wind Power System Based on Input Component of Dissipation Power

ZHONG Hao^{1,2}, ZHOU Qian¹, ZHANG Chunyang¹, LI Xianshan¹

(1. School of Electrical Engineering and Renewable Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Randomicity and intermittence of wind speed make large-scale wind power integration power system dispatch difficult. An active power real-time scheduling method for wind power system based on the dissipated power component is proposed. The response-relationship between the wind turbine generators, conventional units and the loads are derived by using the theory of dissipation power component. And the sensitivity of load power to generator output is calculated. According to the sensitivity information, the power adjustment factors of the participated conventional units are determined in real-time scheduling to compensate the surplus or shortage of power which is caused by fluctuations of wind power output; And in an online scheduling cycle, a real-time optimal scheduling model which takes the minimum total active power loss as the objective function and considers the congestion management and the relationship between the active and reactive power output of the wind farm is established. Finally, the model is applied to analyze of IEEE9-bus and IEEE30-bus system including wind power generation, and the simulation results show that the proposed method is reasonable and correct.

Key words: dissipation power component; response-relationship; sensitivity; power fluctuation; real-time scheduling

0 引言

随着风力发电在电力系统中比重的持续增加,且大规模并网风电场具有大容量、动态及随机性等

特点^[1-4],故难以对风电机组做出准确的调度指令。因此在含风电场的电力实时生产交易中^[5],需要借助系统中其他非风电机组的配合来及时准确地补偿风电输出波动产生的功率偏差。传统的调度方

收稿日期:2018-08-09; 修回日期:2018-10-20

基金项目:湖北省自然科学基金(2016CFA097);梯级水电站运行与控制湖北省重点实验开放基金(2018KJX07)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Hubei Province(2016CFA097), the Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station(2018KJX07).

法均基于电源的可靠性,但当风电机组并入电网后,因风电场输出功率预测精度达不到工程适用的要求,所以依靠传统调度方法来制定发电计划变得非常困难^[6]。目前,国内外关于含风电场电力系统调度问题的研究多以经济调度研究为主^[7-15],文[16]提出的调度方法中,没有对风电的不确定性进行建模分析,只是预留100%风电容量水平的旋转备用确保系统能足够安全运行,这势必造成备用容量的浪费,间接增加了经济调度的发电成本。因此,在调度之前如果清楚地知道风电并网后的电网中每台机组发出的功率在电力系统中是如何分布的,就能够确定发生功率偏差的具体路径和位置^[17-19],做出准确的调度计划。

基于上述分析,文中提出了一种基于耗散功率转归分量的含风电场电力系统有功实时优化调度方法。该方法基于耗散功率分量理论建立发电机组出力与负荷有功间关联关系模型,从而计算出负荷功率、系统总有功损耗、线路有功潮流对发电机出力的灵敏度。并根据灵敏度信息建立以系统总有功网损最小为目标的有功实时优化调度模型,并且考虑了线路潮流约束以及风机有功和无功功率关系约束,确定实时调度中参与调整的常规机组的功率调整因子,以及时补偿风电输出波动而产生的功率过剩或缺额。最后以接入风电场的IEEE9节点和IEEE30节点系统为例对文中所提方法进行仿真分析,算例结果验证了该方法的有效性和准确性。

1 基于耗散功率分量理论的灵敏度分析

1.1 风电机组的数学模型

风电机组大多采用异步发电机,其简化的T型等值电路见图1。

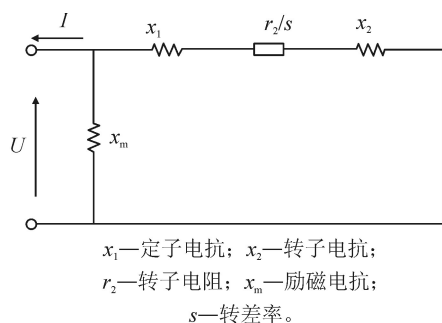


图1 简化的异步风机等值电路

Fig. 1 Simplified equivalent circuit of asynchronous wind turbine

由图1所示电路关系得到

$$P_e = \frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_1^2} \quad (1)$$

式(1)中, $x_1 = x_1 + x_2$, 经计算转差率为

$$s = -\frac{U^2 r_2 - \sqrt{U^4 r_2^2 - 4P_e^2 x_1^2 r_2^2}}{2P_e x_1^2} \quad (2)$$

根据上述等值电路及文[20-21]提出的风电场的PQ迭代模型,可推导出异步风力发电机的无功功率与有功输出之间的关系为

$$Q_e = -\frac{r_2^2 + x_1(x_1 + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_e \quad (3)$$

由于风力发电的原动力是不可控的,其出力的大小取决于风速状况,风机输出功率可近似由风力机的功率曲线求出。文[22]给出其表达式为

$$P_e = P_m = \sum_{i=0}^8 a_i v^i \quad (4)$$

式(4)中: a_1 至 a_8 是风力机功率特性曲线参数,不同风力机稍有差别; v 为风速。

对整个风电场而言,可采用文[23]提出的等值方法将其等值为一台或多台风电机组。

1.2 系统的等值网络

设某一 N 节点系统,有 q 台发电机、 h 个负荷和 b 条线路。将系统中所有发电机等值成节点电流源,所有负荷等值成阻抗。设第 k 台发电机的输入功率和节点电压分别为 $\bar{S}_{Gk}$ 和 $\bar{U}_{Gk}$,则该台发电机 G_k 的等值注入电流为 $\bar{I}_{Gk}$ 为

$$\bar{I}_{Gk} = (\bar{S}_{Gk} / \bar{U}_{Gk})^* \quad (5)$$

式(5)中,*表示共轭。设第 m 个负荷的功率和节点电压分别为 $\bar{S}_{Lm}$ 和 $\bar{U}_{Lm}$,则负荷 L_m 的等值阻抗 $\bar{Z}_{Lm}$ 为

$$\bar{Y}_{Lm} = \bar{S}_{Lm}^* / \bar{U}_{Lm}^2 \quad (6)$$

$$\bar{Z}_{Lm} = 1 / \bar{Y}_{Lm}$$

则上述 N 节点系统可等效为如图2所示的等值模型。

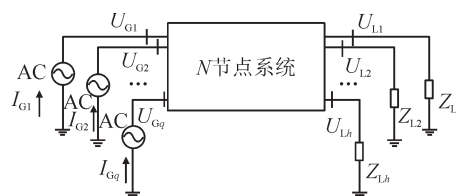


图2 N 节点电力系统等值模型

Fig. 2 Equivalent model of N -nodes power system

1.3 发电机与负荷的响应模型

1.3.1 负荷有功对发电机有功的灵敏度

对于图2所示电力系统等值模型,运用电路定律有

$$\bar{\mathbf{Z}}\bar{\mathbf{I}} = \bar{\mathbf{U}} \quad (7)$$

式(7)中: $\bar{\mathbf{I}} = [\bar{I}_{s1}, \bar{I}_{s2}, \dots, \bar{I}_{sn}]^T$ 为节点注入电流列向量; $\bar{\mathbf{U}} = [\bar{U}_1, \bar{U}_2, \dots, \bar{U}_n]^T$ 为节点电压列向量; $\bar{\mathbf{Z}}$ 为修改后的节点阻抗矩阵, 它是修改后节点导纳矩阵 $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{new}}$ 的逆矩阵, $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{new}}$ 是由原导纳矩阵的负荷节点对应的对角元素分别加上负荷的等值导纳, 其他元素保持不变得到的。即

$$\bar{\mathbf{Z}} = \bar{\mathbf{Y}}_{\text{new}}^{-1} \quad (8)$$

等效节点电流源 i 等值注入电流为

$$\bar{I}_{si} = (P_i - jQ_i)/U_i^* \quad (9)$$

代入式(7)中可求得第 i 台发电机单独作用时, 负荷 L_m 处电压 $\bar{U}_{Lm,i}$, 则第 i 个等值电流源单独作用时, 负荷 L_m 所在支路电流为

$$\bar{I}_{Lm,i} = \bar{U}_{Lm,i} / \bar{Z}_{Lm} \quad (10)$$

则所有发电机共同作用时, 负荷 L_m 所在支路电流为

$$\bar{I}_{Lm} = \sum_{i=1}^q \bar{I}_{Lm,i} \quad (11)$$

由文[24-25]可知: 在电力系统等值电网中, 任意支路的有功耗散功率转归给某节点电源的部分, 等于该节点电源的等值注入电流单独激励下该支路电流响应相量与该支路总电流相量的点积乘以该支路的电阻。

根据上述结论, 则任意负荷支路 L_m 转归给节点电源 i 的有功耗散功率 $P_{Lm,i}$ 为

$$P_{Lm,i} = (\bar{I}_{Lm,i} \cdot \bar{I}_{Lm}) R_{Lm} \quad (12)$$

由式(10)-(12)知 $P_{Lm,i}$ 是一个关于状态变量 U_i 、控制参数 P_i 的函数, 即

$$P_{Lm,i} = F(U_i, P_i) \quad (13)$$

对一 n 节点电力网络, 设有 r 个 PQ 节点, $n-r-1$ 个 PV 节点, 1 个平衡节点。在直角坐标系下, 牛顿法潮流修正方程可表示为

$$-[\mathbf{J}][\Delta \mathbf{U}] = [\Delta \mathbf{W}] \quad (14)$$

式(14)中: $[\mathbf{J}]$ 为雅可比矩阵; $[\Delta \mathbf{W}]$ 为有功、无功和电压幅值平方的偏差量。将潮流计算收敛后的式(14)两边分别对 P_i 求导可得式(15)

$$-[\mathbf{J}] \left[\frac{d\mathbf{U}}{dP_i} \right] = \left[\frac{\partial \Delta \mathbf{W}}{\partial P_i} \right] \quad (15)$$

因此可推导出每个负荷有功对每台发电机有功输出的灵敏度为

$$\begin{aligned} \frac{dP_{Lm,i}}{dP_i} &= \frac{\partial F}{\partial U_i} \times \frac{\partial U_i}{\partial P_i} + \frac{\partial F}{\partial P_i} = \\ &= \frac{\partial F}{\partial U_i} \times \frac{\partial e_i}{\partial P_i} + \frac{\partial F}{\partial P_i} \times \frac{\partial f_i}{\partial P_i} + \frac{\partial F}{\partial P_i} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中, $\frac{\partial e_i}{\partial P_i}$ 、 $\frac{\partial f_i}{\partial P_i}$ 可通过式(15)求得。

1.3.2 系统有功损耗对发电机有功的灵敏度

对于任意联络支路 L , 设首末节点分别为 x 和 y , 则对应稳态情况下, 任意等效节点电流源 i 单独作用时线路 L 的支路电流 $\bar{I}_{L,i}$ 为

$$\bar{I}_{L,i} = (\bar{U}_{x,i} - \bar{U}_{y,i}) / \bar{Z}_{Lm} = [(\bar{Z}_{x,i} - \bar{Z}_{y,i}) / \bar{Z}_{Lm}] \times \bar{I}_{si} \quad (17)$$

式(17)中: $\bar{Z}_{x,i}$ 和 $\bar{Z}_{y,i}$ 为系统修改后节点阻抗矩阵第 x 行第 i 列以及第 y 行第 i 列的元素; $\bar{Z}_{Lm}$ 为支路 L 的阻抗。为方便计算, 采用文[24]的化简方法, 令:

$$\bar{\alpha}_{L,i} = (\bar{Z}_{x,i} - \bar{Z}_{y,i}) / \bar{Z}_{Lm} \quad (18)$$

$$\bar{\alpha}_{L,i} / U_i^* = H_{L,i} + jM_{L,i} \quad (19)$$

则

$$\begin{aligned} \bar{I}_{L,i} &= \bar{\alpha}_{L,i} \times \bar{I}_{si} = \bar{\alpha}_{L,i} \times (P_i - jQ_i) / U_i^* = \\ &= (H_{L,i} + jM_{L,i})(P_i - jQ_i) \end{aligned} \quad (20)$$

所有节点电流源共同作用联络支路 L 时, 总电流响应为

$$\bar{I}_L = \sum_{i=1}^q \bar{I}_{L,i} \quad (21)$$

任意联络支路 L 有功损耗转归给节点电源 i 的有功功率为

$$P_{L,i} = (\bar{I}_{L,i} \cdot \bar{I}_L) R_L \quad (22)$$

将式(20)、(21)代入式(22)中有

$$\begin{aligned} P_{L,i} &= (\bar{I}_{L,i} \cdot \bar{I}_L) R_L = \\ &= \sum_{h=1}^q [(H_{Li}P_i + M_{Li}Q_i)(H_{Lh}P_h + M_{Lh}Q_h)] R_L - \\ &= \sum_{h=1}^q [(M_{Li}P_i - H_{Li}Q_i)(M_{Lh}P_h - H_{Lh}Q_h)] R_L \end{aligned} \quad (23)$$

则所有联络支路总有功损耗转归量 P_{loss} 为

$$\begin{aligned} P_{\text{loss}} &= \sum_{L=1}^b P_{L,i} = \sum_{L=1}^b (\bar{I}_{L,i} \cdot \bar{I}_L) R_L = \\ &= \sum_{L=1}^b \left[\sum_{i=1}^q \sum_{h=1}^q (H_{Li}P_i + M_{Li}Q_i)(H_{Lh}P_h + M_{Lh}Q_h) \right] R_L - \\ &= \sum_{L=1}^b \left[\sum_{i=1}^q \sum_{h=1}^q (M_{Li}P_i - H_{Li}Q_i)(M_{Lh}P_h - H_{Lh}Q_h) \right] R_L \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可推导出系统总有功网损对每台发电机有功输出的灵敏度为

$$\frac{dP_{\text{loss}}}{dP_i} = \sum_{L=1}^b \left(2H_{Li} \times \sum_{k=1}^N (H_{Lk}P_k + M_{Lk}Q_k) \right) R_L - \sum_{L=1}^b \left(2M_{Li} \times \sum_{k=1}^N (M_{Lk}P_k - H_{Lk}Q_k) \right) R_L \quad (25)$$

1.3.3 线路有功对发电机有功的灵敏度

直角坐标系下,线路(设首末节点分别为*i*、*j*)有功潮流表达式为

$$P_{ij} = e_i [G_{ij}(e_i - e_j) - B_{ij}(f_i - f_j)] + f_i [G_{ij}(f_i - f_j) + B_{ij}(e_i - e_j)] + (e_i^2 + f_i^2) \times g_{i0-j} \quad (26)$$

该线路有功潮流对第*k*台发电机*G_k*有功出力的灵敏度为

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_{Gk}} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial e_i} \frac{\partial e_i}{\partial P_{Gk}} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial e_j} \frac{\partial e_j}{\partial P_{Gk}} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial f_i} \frac{\partial f_i}{\partial P_{Gk}} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial f_j} \frac{\partial f_j}{\partial P_{Gk}} \quad (27)$$

2 风电系统的有功实时优化调度模型

2.1 目标函数

文中在一个短时调度周期内,利用风电机组、常规机组与负荷之间的响应关系,建立了以系统总有功网损最小为目标的有功实时优化调度模型。即借助系统中常规机组的配合来实时补偿风电输出有功波动而产生的功率不平衡量。式(24)为系统总有功损耗的表达式,目标函数为

$$\min P_{\text{loss}} = P_{\text{loss}}^I + \Delta P_{\text{loss}} \quad (28)$$

式(28)中: P_{loss}^I 、 P_{loss}^I 分别为当前调度周期和上一调度周期内系统总有功网损; ΔP_{loss} 为系统总有功网损的变化量。

2.2 约束条件

1) 系统有功功率平衡约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^q P_{Gi} + P_{\text{wind}} - \sum_{m=1}^h P_{Lm} - P_{\text{loss}} = 0 \\ P_{Gi} = P_{Gi}^I + \Delta P_{Gi} \\ P_{\text{wind}} = P_{\text{wind}}^I + \Delta P_{\text{wind}} \\ P_{\text{loss}} = P_{\text{loss}}^I + \Delta P_{\text{loss}} \end{cases} \quad (29)$$

式(29)中: P_{Gi} 、 P_{wind} 、 P_{loss} 和 P_{Gi}^I 、 P_{wind}^I 、 P_{loss}^I 分别为该调度周期和上一调度周期内发电机有功出力、风电机组有功出力和系统总有功网损; P_{Lm} 为负荷*L_m*的有功功率; ΔP_{Gi} 、 ΔP_{wind} 、 ΔP_{loss} 为当前调度周期与上一调度周期相比,常规机组、风机、系统总有功网损的变化量。

为满足在线调度快速实时的要求,必须迅速确定参与调整的常规机组的变化量 ΔP_{Gi} 。根据式(30)可确定出满足负荷*L_m*支路有功平衡的各常规机组

调整量 ΔP_{mi} ,则满足整个系统有功功率平衡的各常规机组调整量 ΔP_{Gi} 可由式(31)求得,系统总有功网损变化量如式(32)所示。

$$\frac{dP_{Lm,i}}{dP_{\text{wind}}} \times \Delta P_{\text{wind}} = \sum_{i=1}^q \frac{dP_{Lm,i}}{dP_i} \times \Delta P_{mi} \quad (30)$$

$$\Delta P_{Gi} = \sum_{m=1}^h \Delta P_{mi} \quad (31)$$

$$\Delta P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^q \frac{dP_{\text{loss}}}{dP_i} \times \Delta P_{Gi} \quad (32)$$

2) 发电机组出力约束

$$-\Delta P_{Gi}^{\max} \leq \Delta P_{Gi} \leq \Delta P_{Gi}^{\max} \quad (33)$$

式(33)中, $\Delta P_{Gi}^{\max}$ 、 $-\Delta P_{Gi}^{\max}$ 分别为发电机有功出力可调整范围的上下限。若发电机出力变化过大, ΔP_{Gi} 超出此有效区间则需在新状态下重新计算相关灵敏度矩阵。

3) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (34)$$

式(34)中, $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$ 分别为节点电压上下限。

4) 线路潮流约束。线路不发生阻塞的约束条件为

$$P_{ij} + \Delta P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \quad (35)$$

文中仅对有可能越限的支路按照式(35)进行约束,并非将所有支路纳入线路阻塞管理约束,节省了大量的计算时间。

5) 风机有功输出和无功输出关系约束

$$Q_{\text{wind}} = -\frac{r_2^2 + x_t(x_t + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_{\text{wind}} \quad (36)$$

即文中建立的有功实时优化调度模型为

$$\begin{cases} \min P_{\text{loss}} \\ \sum_{k=1}^q P_{Gk} + P_{\text{wind}} - \sum_{i=1}^h P_{Li} - P_{\text{loss}} = 0 \\ -\Delta P_{Gi}^{\max} \leq \Delta P_{Gi} \leq \Delta P_{Gi}^{\max} \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \\ P_{ij} + \Delta P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \\ Q_{\text{wind}} = -\frac{r_2^2 + x_t(x_t + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_{\text{wind}} \end{cases} \quad (37)$$

3 求解过程

3.1 算法流程

文中提出的有功实时优化调度模型计算流程:

1) 首先利用PQ迭代法对含风电场的电力系统进行潮流计算;

2) 利用耗散功率理论推导发电机组与各负荷、线路有功功率关系的表达式;

3) 根据式(16)确定各负荷有功对各发电机有功

出力的灵敏度矩阵;

- 4)在当前调度周期内,根据3)中求得的灵敏度矩阵按照调度策略设计预选调度方案;
- 5)在4)设计的预调度方案中按照式(37)确定最终实时优化调度方案。

3.2 调度策略

根据式(16)求得的灵敏度矩阵可确定发电机组有功出力与各负荷有功关联的紧密程度,灵敏度绝对值越大,关联程度越紧密,当风机出力发生变化时,关联程度越紧密的负荷受到的影响越大,应快速调整相关常规机组出力及时补偿因风机出力变化产生的功率缺额或过剩。具体调度策略如下:

- 1)将负荷按照其有功功率对风机有功出力的灵敏度绝对值大小降序排列;
- 2)确定与风机关联最紧密负荷集 L_1 ,关联次紧密负荷集 L_2 ;
- 3)接着确定与负荷集 L_1 紧密关联的常规机组集 GL_{11} ,次关联的常规机组集 GL_{12} 以及与负荷集 L_2 紧密关联的常规机组集 GL_{21} 、次关联的常规机组集 GL_{22} ;
- 4)当风电机组有功出力波动变化时,在紧密关联机组集 GL_{11} 、 GL_{12} 、 GL_{21} 、 GL_{22} 中筛选出参与调整的常规机组,做出预调度方案。

5)在预调度方案中,按照式(37)确定参与调整的常规机组的功率调整因子,快速调整相应机组出力以满足系统有功平衡。

上述调度策略避免了复杂的计算过程,极大的缩短了确定最终优化调度方案的时间,满足在线实时调度的快速性要求。

4 仿真实验

文中利用 MATLAB 对多个节点系统进行仿真计算,由于篇幅有限,下面用修改的 IEEE9 节点系统为例进行论述分析。该系统包含 3 台发电机和 4 个负荷,其中节点 1、2、3 接有常规机组,节点 5、7、8、9 接有负荷。将风电场接入到 4 号节点对应的母线上,见图 3。单台风机参数取自文[26],系统共有一个并网风电场,包括 300 台风机,计算过程中采用标么值,功率基准值取为 100 MV·A。



图3 风电场接入 IEEE9 节点系统图

Fig. 3 Wind farm connected to IEEE9 system

4.1 可行性分析

鉴于风速的随机性和波动性,当前调度周期相

对于上一调度周期风机有功输出可能增多也可能减少,因此模拟以下两种场景:

- 场景 I:当风机增发 0.1 p.u.时,1、3 号机组分别降低 0.05 p.u.;
- 场景 II:当风机减少 0.1 p.u.时,1、3 号机组分别增加 0.04、0.06 p.u.。

为验证文中方法的可行性,定义了两个描述各负荷有功转归给每台发电机有功出力的误差指标和一个描述每个负荷的误差指标:①绝对误差(ϵ)=实际变化量-理论变化量;②误差率(δ)=|绝对误差|/系统发电机出力的变化量;③相对误差率(Ψ)=|某负荷绝对误差|/基准值。

上述中实际变化量是指按照耗散功率转归分量求得的变化量,是一个准确值;理论变化量是指按照文中灵敏度方法求得的变化量,是一个理论值。

两种场景下每台发电机对每个负荷潮流贡献量的绝对误差和误差率的结果见表 1、2,两种场景下每个负荷的相对误差率见表 3。数据结果验证了文中方法的有效性。

表 1 两种场景下绝对误差情况

Table 1 Absolute errors of two scenarios $\times 10^{-3}$ p.u.

发电机		负荷编号			
编号		5	7	8	9
场景 I	1	-0.287 9	0.228 7	-0.140 8	-1.003 1
	2	0.109 3	0.190 2	0.259 3	0.409 5
	3	-1.043 0	-3.101 0	-1.380 1	-1.789 1
	4	0.484 7	-4.778 6	-2.717 8	1.117 3
场景 II	1	0.304 3	-0.554 5	-0.025 9	1.123 2
	2	0.160 7	-0.303 6	-0.375 6	-0.569 7
	3	1.267 1	3.821 1	1.709 1	2.169 8
	4	-0.479 4	4.794 7	2.735 8	-1.096 5

表 2 两种场景下误差率情况

Table 2 Error rates of two scenarios %

发电机		负荷编号			
编号		5	7	8	9
场 景 I	1	0.14	0.11	0.07	0.52
	2	0.05	0.10	0.13	0.20
	3	0.52	1.55	0.69	0.89
	4	0.24	2.39	1.36	0.56
场 景 II	1	0.15	0.28	0.01	0.56
	2	0.08	0.15	0.19	0.28
	3	0.63	1.91	0.85	1.08
	4	0.24	2.40	1.37	0.55

表3 两种场景下各负荷相对误差率情况

Table 3 The relative error rate of each load in the two scenarios

负荷 编号	场景 I		场景 II	
	$\varepsilon \times 10^{-3}$	$\Psi/\%$	$\varepsilon \times 10^{-3}$	$\Psi/\%$
5	-0.736 8	0.21	0.931 4	0.26
7	-7.460 6	0.59	7.757 7	0.62
8	-3.979 4	0.44	4.043 5	0.45
9	-1.259 4	0.13	1.626 9	0.16

4.2 算例分析

以上述接有风电场的 IEEE9 节点系统为例进行分析,设该风电场某一调度周期内接入 200 台风机,输出有功为 0.8 p.u.,由于风速的波动性,假设在下一个在线调度周期内(5 min)风速减小,输出有功变为 0.7 p.u.。为满足功率平衡需实时调整常规机组的有功出力。负荷有功对发电机有功出力的灵敏度矩阵见表 4。

表4 负荷有功对发电机有功出力的灵敏度矩阵

Table 4 The sensitivity matrix of the active power of each load to each generator

发电机 编号	负荷编号			
	5	7	8	9
1	0.091 9	0.342 8	0.244 5	0.262 1
2	0.026 6	0.167 3	0.138 3	0.108 8
3	0.111 3	0.372 5	0.250 9	0.295 3
4	0.094 2	0.283 0	0.207 9	0.265 7

由表 4 给出的负荷有功对发电机有功出力的灵敏度矩阵可知,与风机紧密关联的负荷集 L_i 是 7、9 号负荷,因此当风机出力发生变化时,7、9 号负荷受影响最大,为满足实时调度要求,必须快速调整常规机组出力补偿风速变小所带来的功率缺额,与 7、9 号负荷关联较紧密的常规机组集 GL_i 是 1、3 号机组,因此首选调整 1、3 号机组出力。

按照文中灵敏度方法(方法 I)和单纯依靠平衡机参与调整(方法 II)的调整方案见表 5。稳态列为上一调度周期系统功率平衡下各机组出力情况,由表 5 分析可知:当风机有功出力减少 0.1 p.u.时,为满足系统功率平衡,方法 I 中 1、3 号机组分别增发 0.009 3、0.092 5 p.u.,方法 II 中仅平衡机即 2 号机组增发 0.103 8 p.u.,1、3 号机组出力不变。两种方法相比,方法 I 系统总有功网损较小。且由表 4 中的灵敏度信息可知,负荷集 L_i 与 2 号发电机的紧密关联程度小于 1、3 号机组,则方法 I 响应速度更快。

利用文中灵敏度方法求得的各发电机对各负荷潮流贡献的理论结果见表 6,由表 6 中数据可得所有发电机共同作用对负荷的潮流贡献结果满足了

表5 不同调度方法下的机组出力计划

Table 5 Unit output plans under different scheduling methods

发电机编号及总有功网损	p.u.		
	稳态	方法 I	方法 II
1	0.255 7	0.265 0	0.255 7
2	1.630 0	1.630 0	1.733 8
3	0.850 0	0.942 5	0.850 0
4	0.800 0	0.700 0	0.700 0
总有功网损	0.035 7	0.037 8	0.039 5

负荷的需求。按照表 5 中方法 I 出力计划对原始稳态数据进行修改并重新进行潮流计算,所得潮流准确结果与表 5 中方法 I 给出的各发电机理论出力值相比,仅平衡机(2 号发电机)出力发生变化,具体变化量见表 7。对于 IEEE9 节点系统,在实际潮流计算时平衡机多增发 0.001 2 p.u.,相对误差率为 0.074%,且系统总有功网损增加 0.000 9 p.u.,可见平衡机增发的有功大部分被用于补偿系统增加的总有功网损。对于 IEEE30 节点系统,将风电场接入到 5 号节点对应的母线上,设该风电场某一调度周期内接入 75 台风机,输出有功为 0.3 p.u.,由于风速的波动性,假设在下一个在线调度周期内(5 min)风速减小,输出有功变为 0.2 p.u.。按照文中方法建立有功实时优化调度模型,求得的各发电机理论出力与实际潮流计算的准确结果相比,平衡机在实际潮流计算时多增发 0.000 9 p.u.,相对误差率为 0.214 8%,其中有 0.000 7 p.u.用来补偿系统总有功网损的增加量,因此表 7 中数据说明了文中方法的准确性。

表6 各发电机对各负荷潮流贡献理论值

Table 6 The theoretical value of the contribution of each generator to the load flow

发电机 编号	p.u.			
	5	7	8	9
1	0.030 1	0.162 8	0.112 2	0.088 9
2	0.165 3	0.537 9	0.386 7	0.460 3
3	0.093 0	0.312 5	0.236 5	0.275 7
4	0.062 3	0.237 8	0.169 2	0.178 1

表7 平衡机出力误差情况

Table 7 The output error rates of balancing units

系统名称	绝对误差/p.u.	相对误差率/%
IEEE9 节点	0.001 2	0.073 6
IEEE30 节点	0.000 9	0.214 8

5 结语

文中研究了含风电场电力系统有功实时调度问题,基于耗散功率分量理论建立发电机组出力与

负荷有功间关联关系模型,推导出负荷有功功率、系统总有功网损、系统支路有功潮流对发电机有功出力的灵敏度。并根据灵敏度信息,确定实时调度中参与调整的常规机组的功率调整因子,以及时补偿系统中因风电输出波动而产生的功率不平衡量。最后接有风电场的IEEE9节点和IEEE30节点系统的仿真结果验证了文中所提方法的准确性和有效性。并且文中方法是以系统总有功网损最小为目标,并计及线路阻塞管理和风机的有功和无功功率关系约束,比单纯依靠平衡机进行调整的系统总有功网损小,且响应速度快,是解决含风电场电力系统的在线实时调度问题的一种有效的工具。

参考文献:

- [1] 丁 宇,陈永华,李雪明,等. 大规模风电并网控制技术现状与展望[J]. 广东电力,2011,24(5):24-28.
DING Yu, CHEN Yonghua, LI Xueming, et al. Status quo and prospect on control technique for large-scale synchronization of wind power[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(5):24-28.
- [2] 李俊峰,时璟丽,施鹏飞,等. 风力在12中国[M]. 北京:化工大学出版社,2005.
LI Junfeng, SHI Jingli, SHI Pengfei, et al. Wind power 12 grade in China[M]. Beijing: University of Chemical Technology Press, 2005.
- [3] 刘世林,文劲宇,孙海顺,等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(23):145-153.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23):145-153.
- [4] 李 晖,马喜平,董开松,等. 大电网末端风力发电系统故障穿越关键技术[J]. 高压电器,2017,53(1):192-196.
LI Hui, MA Xiping, DONG Kaisong, et al. Fault ride through for wind power system in the terminal of the power grid system[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1):192-196.
- [5] 李 扬,葛 乐,林 一. 电力市场下计及节能环保的实时发电调度策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):42-45.
LI Yang, GE Le, LIN Yi. Real-time power dispatch strategy considering energy saving and environmental protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3):42-45.
- [6] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化,2003,27(8):84-89.
LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8):84-89.
- [7] 张海峰,高 峰,吴 江,等. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术,2013,37(5):1298-1303.
ZHANG Haifeng, GAO Feng, WU Jiang, et al. A dynamic economic dispatching model for power grid containing wind power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1298-1303.
- [8] 周 玮,彭 昱,孙 辉,等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(25):13-18.
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25):13-18.
- [9] 郭永明,李仲昌,尤小虎,等. 计及备用容量优化配置的风火联合随机经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(24):1-6.
GUO Yongming, LI Zhongchang, YOU Xiaohuo, et al. Stochastic economic dispatch model for joint delivery of wind power and thermal power generation system considering optimal scheduling of reserve capacity[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24):1-6.
- [10] 李禹鹏,冯 楠,崔 勇,等. 考虑风电不确定性及柔性负荷的安全约束机组组合问题研究[J]. 电力建设,2017,38(2):129-137.
LI Yupeng, FENG Nan, CUI Yong, et al. Security constrained unit commitment problem considering wind power uncertainty and flexible load[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2):129-137.
- [11] 周 玮,胡姝博,孙 辉,等. 考虑大规模风电并网的电力系统区间非线性经济调度研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):557-564.
ZHOU Wei, HU Shubo, SUN Hui, et al. Interval nonlinear economic dispatch in large scale wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):557-564.
- [12] 盛四清,孙晓霞. 风电-抽水蓄能联合运行优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(11):100-103.
SHENG Siqing, SUN Xiaoxia. Operational optimization model for combined operation of wind power and pumped-storage plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(11):100-103.
- [13] 周 玮,孙 辉,顾 宏,等. 含风电场的电力系统经济调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24):148-154.
ZHOU Wei, SUN Hui, GU Hong, et al. A review on economic dispatch of power system including wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24):148-154.
- [14] 袁铁江,晁 勤,吐尔逊·伊不拉音,等. 面向电力市场的含风电电力系统的环境经济调度优化[J]. 电网技术,2009,33(20):131-135.
YUAN Tiejiang, CHAO Qin, TU Erxun·yibulayin, et al. Electricity market-oriented optimization of environmental economic dispatching for power grid containing wind power[J]. Power System Technology, 2009, 33(20):131-135.
- [15] CHEN C L, LEE T Y, JAN R M. Optimal wind-thermal coordination dispatch in isolated power systems with large integration of wind capacity[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(18/19):3456-3472.
- [16] 魏 萍,倪以信,吴复立,等. 基于图论的输电线路功率

- 组成和发电机与负荷间功率输送关系的快速分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 22-26.
- WEI Ping, NI Yixin, WU Fuli, et al. Power transfer allocation for open access using graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 22-26.
- [17] WEI Ping, YUAN Bin, NI Yixin, et al. Power flow tracing for transmission open access[C]//IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. London: [s.n.], 2000: 476-481.
- [18] 谢开贵, 李春燕, 赵 渊, 等. 电力系统功率分配的解析模型和算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 27-31.
- XIE Kaigui, LI Chunyan, ZHAO Yuan, et al. Electrical analytical model and algorithm for distributing power using the downstream distribution matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 27-31.
- [19] QU Zhijiang, QIN Jianhua, WANG Xintao, et al. A power flow tracing method based on the circuit analysis of power supply path[C]//Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE, 2011: 1-6.
- [20] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.
- WU Junling, ZHOU Shuangxi, SUN Jianfeng, et al. Analysis on maximum power injection of wind farm connected to power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 28-32.
- [21] 张 元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
- ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [22] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [23] 曹 娜, 赵海翔, 陈默子, 等. 潮流计算中风电场的等值[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 53-56.
- CAO Na, ZHAO Haixiang, CHEN Mozi, et al. Equivalence method of wind farm in steady-state load flow calculation[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 53-56.
- [24] 黄泽荣, 彭建春, 肖文娟, 等. 基于耗散功率转归分量的网损微增率新算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 31-36.
- HUANG Zerong, PENG Jianchun, XIAO Wenxian, et al. Incremental transmission loss algorithm based on the imputation of an impedance-branch dissipation power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 31-36.
- [25] 彭建春, 江 辉. 基于两步联盟博弈的输电网损耗分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 57-63.
- PENG Jianchun, JIANG Hui. A two-step coalitional game based transmission losses allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 57-63.
- [26] 吴义纯, 丁 明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.
- WU Yichun, DING Ming, ZHANG Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39.
- 钟 浩(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行控制及风力发电技术。
- 周 倩(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制。
- 张春阳(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制。

(上接第148页)

- High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 135-140.
- [21] 罗志娟. 新型介质阻挡放电特性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- LUO Zhijuan. Study on the characteristics of new dielectric barrier discharge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [22] 梁 英. 高温硫化(HTV)硅橡胶电晕老化特性及机理的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- LIANG Ying. Study on the corona aging characteristics and mechanism of HTV silicone rubber[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [23] 覃永雄, 虞 澜, 傅 佳, 等. 长波紫外照射下高温硫化硅橡胶的微观物性及憎水性研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 242-250.
- QIN Yongxiong, YU Lan, FU Jia, et al. Research on microscopic properties and hydrophobicity of high temperature vulcanization silicone rubber under long-wave ultraviolet radiation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 242-250.
- [24] 陈晓春, 李洛琦, 吴照国, 等. 挂网运行复合绝缘子伞裙性能研究[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 104-108.
- CHEN Xiaochun, LI Luoqi, WU Zhaoguo, et al. Research on shed properties of network operating composite insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6): 104-108.
- 董平平(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。
- 杨 茹(1979—), 女, 高级工程师, 从事电网运行管理工作。
- 陈永明(1979—), 男, 高级工程师, 从事电网运行管理工作。
- 高丽娟(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。