



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111130122 B

(45) 授权公告日 2021.06.29

(21) 申请号 202010038166.8

CN 110635494 A, 2019.12.31

(22) 申请日 2020.01.14

US 2010/0134076 A1, 2010.06.03

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 111130122 A

Kuan Zhang, Guangchao Geng. Online Tracking of Reactive Power Reserve For Wind Farms. 《IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY》. 2019, 正文第1100页第2栏第2段-第1102页第2栏第2段, 附图1-5.

(43) 申请公布日 2020.05.08

(73) 专利权人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

专利权人 国网新疆电力有限公司

江全元, 耿光超. 含高压直流输电系统的内点最优潮流算法. 《中国电机工程学报》. 2009, 全文.

(72) 发明人 耿光超 张宽 江全元 王衡

张锋 于鹤洋

Bruno Leonardi. Development of Multilinear Regression Models for Online Voltage Stability Margin Estimation. 《IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS》. 2011, 全文.

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司 33200

代理人 傅朝栋 张法高

审查员 王克

(51) Int. Cl.

H02J 3/16 (2006.01) (续)

(56) 对比文件

CN 107591811 A, 2018.01.16

CN 109301882 A, 2019.02.01

CN 109525000 A, 2019.03.26

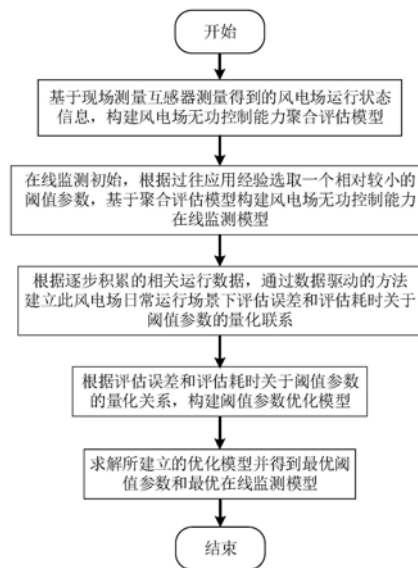
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种风电场无功控制能力在线监测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种风电场无功控制能力在线监测方法。该方法首先结合现场测量互感器测量得到的风电场运行状态信息, 构建风电场无功控制能力聚合评估模型; 然后基于过往应用经验选取一个相对较小的基准点更新阈值参数构建风电场无功控制能力在线监测模型; 在上述模型的基础上, 根据逐步积累的相关运行数据, 通过数据驱动的方法拟合风电场日常运行场景下评估误差和评估耗时关于阈值参数的量化关系; 最后构建基准点更新阈值参数优化模型并加以求解, 得到评估基准点动态更新阈值的最优取值, 从而实现风电场无功控制能力在线监测模型的最优运行效果。



CN 111130122 B

[接上页]

(51) Int.Cl.

H02J 3/38 (2006.01)

H02J 3/50 (2006.01)

(56) 对比文件

Haiying Dong. Aggregation modeling of

wind farms based on multi machine representation.《2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)》.2018,全文.

李洋麟.基于卷积神经网络的电力系统小干扰稳定评估.《电力系统自动化》.2019,全文.

1. 一种风电场无功控制能力在线监测方法,其特征在于,步骤如下:

S1: 构建风电场无功控制能力聚合评估模型;

S2: 构建风电场无功控制能力在线监测模型;

S3: 在风电场无功控制能力聚合评估模型和风电场无功控制能力在线监测模型的基础上,根据逐步积累的运行数据,通过数据驱动的方法,拟合风电场日常运行场景下评估误差和评估耗时分别与阈值参数之间的量化关系;

S4: 根据所述的量化关系,构建阈值参数优化模型并加以求解,最终得到评估基准点动态更新阈值的最优取值,使风电场无功控制能力在线监测达到最优性能;

所述的步骤S1中,风电场无功控制能力聚合评估模型 P_1 基于现场测量互感器测量得到的风电场运行状态信息进行构建,模型 P_1 的形式如下:

$$Q_{PCC}^{\max} = \max_{Q_i^{WT}, Q_i^c} Q_{PCC}$$

$$Q_{PCC}^{\min} = \min_{Q_i^{WT}, Q_i^c} Q_{PCC}$$

$$s.t. \quad f_{PF}(P_i^{WT}, Q_i^{WT}, Q_i^c, P_{ij}^l, Q_{ij}^l, v_i^{WT}, \delta_i^{WT}) = 0$$

$$h_{safe}(P_i^{WT}, Q_i^{WT}, Q_i^c, P_{ij}^l, Q_{ij}^l, v_i^{WT}, \delta_i^{WT}) \leq 0$$

$$i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$$

式中, Q_i^{WT} 、 Q_i^c 均为优化变量, Q_i^{WT} 表示风电场内部第i台风电机组的无功出力, Q_i^c 表示风电场内部第i组无功补偿装置的无功出力; Q_{PCC}^{\max} 、 Q_{PCC}^{\min} 均为目标函数, Q_{PCC}^{\max} 表示风电场出口无功出力的最大值, Q_{PCC}^{\min} 表示风电场出口无功出力的最小值, Q_{PCC}^{\max} 和 Q_{PCC}^{\min} 的差值即可反映风电场的无功控制能力; Q_{PCC} 表示风电场出口的无功出力; P_i^{WT} 表示第i台风电机组的有功出力; P_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的有功潮流; Q_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的无功潮流; v_i^{WT} 表示第i台风电机组接入节点的电压幅值; δ_i^{WT} 表示第i台风电机组接入节点的电压相角; n表示风电场内部风电机组的数量; f_{PF} 表示风电场的潮流约束, h_{safe} 表示风电场的安全约束, 其具体形式如下:

$$f_{PF}: \begin{cases} P_i - v_i \sum v_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - v_i \sum v_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

$$h_{safe}: \begin{cases} \underline{Q_i^{WT}} \leq Q_i^{WT} \leq \overline{Q_i^{WT}} \\ \underline{Q_i^c} \leq Q_i^c \leq \overline{Q_i^c} \\ \underline{P_{ij}^l} \leq P_{ij}^l \leq \overline{P_{ij}^l} \\ \underline{Q_{ij}^l} \leq Q_{ij}^l \leq \overline{Q_{ij}^l} \\ \underline{v_i^{WT}} \leq v_i^{WT} \leq \overline{v_i^{WT}} \end{cases}$$

式中: G_{ij} 表示节点i、j之间的线路电导; B_{ij} 表示节点i、j之间的线路电纳; v_i 表示节点i的电压幅值; v_j 表示节点j的电压幅值; δ_{ij} 表示节点i、j之间的相角差; P_i 表示节点i的注入

有功功率,由 P_i^{WT} 和节点接入信息决定; Q_i 表示节点i的注入无功功率,由 Q_i^{WT} 、 Q_i^c 和节点接入信息决定; \underline{Q}_i^{WT} 表示第i台风电机组的无功出力下限; \overline{Q}_i^{WT} 表示第i台风电机组的无功出力上限; \underline{Q}_i^c 表示第i组无功补偿装置的无功出力下限; \overline{Q}_i^c 表示第i组无功补偿装置的无功出力上限; \underline{P}_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的有功潮流下限; \overline{P}_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的有功潮流上限; \underline{Q}_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的无功潮流下限; \overline{Q}_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的无功潮流上限; \underline{v}_i^{WT} 表示第i台风电机组接入节点电压幅值的下限; \overline{v}_i^{WT} 表示第i台风电机组接入节点电压幅值的上限;

所述的步骤S2中,风电场无功控制能力在线监测模型为:

在线监测初始阶段,预设一个阈值参数 D_T ,基于模型 P_1 构建风电场无功控制能力在线监测模型 P_2 ,模型 P_2 的形式如下:

$$Q_{online}^{capability} = \begin{cases} Q_{base}^{capability} + \left. \frac{dQ^{capability}}{dp} \right|_{base} \Delta p & , \text{if } D_t \leq D_T \\ \text{solve } P_1(p_{base} + \Delta p) & , \text{if } D_t > D_T \end{cases}$$

式中, $Q_{online}^{capability}$ 为风电场的实时无功控制能力, $Q_{base}^{capability}$ 为风电场在基准点的无功控制能力, Δp 为扰动变化量, $\left. \frac{dQ^{capability}}{dp} \right|_{base}$ 为基准点处风电场无功控制能力相对于系统扰动变量的最优灵敏度; p_{base} 为基准时刻的扰动变量, $\text{solve } P_1(p_{base} + \Delta p)$ 表示求解扰动变量($p_{base} + \Delta p$)下的模型 P_1 ;

阈值参数 D_t 为基准点更新判据,用以衡量扰动大小, D_t 选取为当前评估点相对于基准点的欧式距离,表达式如下:

$$D_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_t^i - p_{base}^i)^2}{N}}$$

式中: p_t^i 表示t时刻的第i个扰动变量; p_{base}^i 表示基准时刻的第i个扰动变量; N 为扰动变量数目;

当更新判据 D_t 不超过阈值 D_T 时,说明扰动较小,可通过最优灵敏度信息进行线性化近似估计;当更新判据 D_t 超过阈值 D_T 时,说明扰动较大,需要重新计算 P_1 ,并更新基准点为当前评估点。

2.如权利要求1所述的一种风电场无功控制能力在线监测方法,其特征在于:所述的步骤S3中,评估误差和评估耗时关于阈值参数的量化关系的构建方法为:

随着监测时间的推进,根据逐步积累的运行数据,通过数据驱动的方法拟合当前风电场日常运行场景下,评估误差 E 关于系统扰动 Δp 的函数关系 $f(\Delta p)$,以及评估耗时 T 关于基准点更新次数 N 的函数关系 $f(N)$,所述函数为非线性函数或线性函数;系统扰动 Δp 和基准点更新次数 N 均由阈值参数 D_T 计算得出,由此得到评估误差 E 和评估耗时 T 关于阈值参数 D_T 的量化联系,如下所示:

$$E=f(\Delta p)=f_E(D_T)$$

$$T=f(N)=f_T(D_T)$$

式中： $f_E(D_T)$ 表示评估误差E关于阈值参数 D_T 的函数关系； $f_T(D_T)$ 表示表示评估耗时T关于阈值参数 D_T 的函数关系。

3.如权利要求2所述的一种风电场无功控制能力在线监测方法,其特征在于:所述的步骤S4中,阈值参数优化模型 P_3 在评估误差E和评估耗时T关于阈值参数 D_T 的量化关系的基础上进行构建,模型 P_3 形式如下:

$$\min_{D_T} \alpha f_E(D_T) + \beta f_T(D_T)$$

$$s.t. \quad f_E(D_T) \leq \overline{f_E(D_T)}$$

$$f_T(D_T) \leq \overline{f_T(D_T)}$$

$$\underline{D_T} \leq D_T \leq \overline{D_T}$$

式中, α 和 β 分别为评估误差E和评估耗时T在优化目标函数中的权重因子,均由风电场运营偏好决定; $\overline{f_E(D_T)}$ 表示评估误差上限; $\overline{f_T(D_T)}$ 表示评估耗时上限; $\underline{D_T}$ 表示阈值参数下限; $\overline{D_T}$ 表示阈值参数上限;

通过求解所建立的参数优化模型 P_3 ,即可得到评估基准点动态更新阈值 D_T 的最优取值,从而使得风电场无功控制能力在线监测方法在实际应用中达到最优性能。

一种风电场无功控制能力在线监测方法

技术领域

[0001] 本发明属于可再生新能源发电并网电压无功优化控制领域,具体涉及一种风电场无功控制能力在线监测方法。

背景技术

[0002] 在大规模开发利用可再生新能源所面临的众多挑战当中,电压稳定问题尤为突出。进一步提升可再生新能源发电并网系统的无功电压管理能力,是建设坚强智能电网的重要内容和必要条件。目前,大多数可再生新能源发电基地都保持单位功率因数运行,即不与外界进行无功交换,但是随着未来电力系统中可再生新能源渗透率越来越高,受其出力的随机性与波动性的影响,含可再生新能源电力系统的电压稳定问题将越来越严重,因此,可再生新能源发电基地作为系统的一种潜在无功电源有必要参与系统的综合无功调整及电压控制体系。传统电力系统的自动电压控制(automatic voltage control,AVC)体系一般由运行在控制中心的主站系统与运行在厂站侧的子站系统构成,二者通过调度数据网进行远程通信。AVC系统利用数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition,SCADA)系统的遥测与遥信功能,将电网各节点运行状态实时采集并上传至控制中心,在控制中心主站系统内进行优化决策,得到对全网不同控制设备的优化调节指令,并通过SCADA系统的遥控与遥调功能下发至厂站侧,由厂站侧子站系统或监控系统最终执行,实现自动、闭环、优化控制。因此,若要将下层可再生新能源发电基地整合进上层AVC系统,对下层可再生新能源发电基地的实时无功控制能力等状态信息进行在线评估监测则显得尤为重要。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于为风电场运营方和电网调度方提供一种风电场无功控制能力在线监测方法,

[0004] 为实现上述发明的目的,本发明解决其技术问题所采用的方案是:

[0005] 一种风电场无功控制能力在线监测方法,步骤如下:

[0006] S1:构建风电场无功控制能力聚合评估模型;

[0007] S2:构建风电场无功控制能力在线监测模型;

[0008] S3:在风电场无功控制能力聚合评估模型和风电场无功控制能力在线监测模型的基础上,根据逐步积累的运行数据,通过数据驱动的方法,拟合风电场日常运行场景下评估误差和评估耗时分别与阈值参数之间的量化关系;

[0009] S4:根据所述的量化关系,构建阈值参数优化模型并加以求解,最终得到评估基准点动态更新阈值的最优取值,使风电场无功控制能力在线监测达到最优性能。

[0010] 在上述技术方案基础上,各步骤还可以进一步采用如下优选方式实现。

[0011] 所述的步骤S1中,风电场无功控制能力聚合评估模型 P_1 基于现场测量互感器测量得到的风电场运行状态信息进行构建,模型 P_1 的形式如下:

$$[0012] \quad Q_{PCC}^{\max} = \max_{Q_i^{WT}, Q_i^c} Q_{PCC}$$

$$[0013] \quad Q_{PCC}^{\min} = \min_{Q_i^{WT}, Q_i^c} Q_{PCC}$$

$$[0014] \quad \text{s. t. } f_{PF}(P_i^{WT}, Q_i^{WT}, Q_i^c, P_{ij}^l, Q_{ij}^l, v_i^{WT}, \delta_i^{WT}) = 0$$

$$[0015] \quad h_{safe}(P_i^{WT}, Q_i^{WT}, Q_i^c, P_{ij}^l, Q_{ij}^l, v_i^{WT}, \delta_i^{WT}) \leq 0$$

$$[0016] \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$$

[0017] 式中, Q_i^{WT} 、 Q_i^c 均为优化变量, Q_i^{WT} 表示风电场内部第i台风电机组的无功出力, Q_i^c 表示风电场内部第i组无功补偿装置的无功出力; Q_{PCC}^{\max} 、 Q_{PCC}^{\min} 均为目标函数, Q_{PCC}^{\max} 表示风电场出口无功出力的最大值, Q_{PCC}^{\min} 表示风电场出口无功出力的最小值, Q_{PCC}^{\max} 和 Q_{PCC}^{\min} 的差值即可反映风电场的无功控制能力; Q_{PCC} 表示风电场出口的无功出力; P_i^{WT} 表示第i台风电机组的有功出力; P_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的有功潮流; Q_{ij}^l 表示节点i、j之间线路的无功潮流; v_i^{WT} 表示第i台风电机组接入节点的电压幅值; δ_i^{WT} 表示第i台风电机组接入节点的电压相角; n表示风电场内部风电机组的数量; f_{PF} 表示风电场的潮流约束, h_{safe} 表示风电场的安全约束, 其具体形式如下:

$$[0018] \quad f_{PF}: \begin{cases} P_i - v_i \sum v_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - v_i \sum v_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

$$[0019] \quad h_{safe}: \begin{cases} \underline{Q_i^{WT}} \leq Q_i^{WT} \leq \overline{Q_i^{WT}} \\ \underline{Q_i^c} \leq Q_i^c \leq \overline{Q_i^c} \\ \underline{P_{ij}^l} \leq P_{ij}^l \leq \overline{P_{ij}^l} \\ \underline{Q_{ij}^l} \leq Q_{ij}^l \leq \overline{Q_{ij}^l} \\ \underline{v_i^{WT}} \leq v_i^{WT} \leq \overline{v_i^{WT}} \end{cases}$$

[0020] 式中: G_{ij} 表示节点i、j之间的线路电导; B_{ij} 表示节点i、j之间的线路电纳; v_i 表示节点i的电压幅值; v_j 表示节点j的电压幅值; δ_{ij} 表示节点i、j之间的相角差; P_i 表示节点i的注入有功功率, 由 P_i^{WT} 和节点接入信息决定; Q_i 表示节点i的注入无功功率, 由 Q_i^{WT} 、 Q_i^c 和节点接入信息决定; $\underline{Q_i^{WT}}$ 表示第i台风电机组的无功出力下限; $\overline{Q_i^{WT}}$ 表示第i台风电机组的无功出力上限; $\underline{Q_i^c}$ 表示第i组无功补偿装置的无功出力下限; $\overline{Q_i^c}$ 表示第i组无功补偿装置的无功出力上限; $\underline{P_{ij}^l}$ 表示节点i、j之间线路的有功潮流下限; $\overline{P_{ij}^l}$ 表示节点i、j之间线路的有功潮流上限; $\underline{Q_{ij}^l}$ 表示节点i、j之间线路的无功潮流下限; $\overline{Q_{ij}^l}$ 表示节点i、j之间线路的无功潮流上限; $\underline{v_i^{WT}}$ 表示第i台风电机组接入节点电压幅值的下限; $\overline{v_i^{WT}}$ 表示第i台风电机组接入节点电压幅值的上限。

[0021] 所述的步骤S2中, 风电场无功控制能力在线监测模型为:

[0022] 在线监测初始阶段,预设一个阈值参数 D_T ,基于模型 P_1 构建风电场无功控制能力在线监测模型 P_2 ,模型 P_2 的形式如下:

$$[0023] \quad Q_{online}^{capability} = \begin{cases} Q_{base}^{capability} + \left. \frac{dQ^{capability}}{dp} \right|_{base} \Delta p & , \text{if } D_t \leq D_T \\ \text{solve } P_1(p_{base} + \Delta p) & , \text{if } D_t > D_T \end{cases}$$

[0024] 式中, $Q_{online}^{capability}$ 为风电场的实时无功控制能力, $Q_{base}^{capability}$ 为风电场在基准点的无功控制能力, Δp 为扰动变化量, $\left. \frac{dQ^{capability}}{dp} \right|_{base}$ 为基准点处风电场无功控制能力相对于系统扰动变

量的最优灵敏度; p_{base} 为基准时刻的扰动变量, $\text{solve } P_1(p_{base} + \Delta p)$ 表示求解扰动变量($p_{base} + \Delta p$)下的模型 P_1 ;

[0025] 阈值参数 D_t 为基准点更新判据,用以衡量扰动大小, D_t 选取为当前评估点相对于基准点的欧式距离,表达式如下:

$$[0026] \quad D_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_t^i - p_{base}^i)^2}{N}}$$

[0027] 式中: p_t^i 表示t时刻的第i个扰动变量; p_{base}^i 表示基准时刻的第i个扰动变量;N为扰动变量数目;

[0028] 当更新判据 D_t 不超过阈值 D_T 时,说明扰动较小,可通过最优灵敏度信息进行线性化近似估计;当更新判据 D_t 超过阈值 D_T 时,说明扰动较大,需要重新计算 P_1 ,并更新基准点为当前评估点。

[0029] 所述的步骤S3中,评估误差和评估耗时关于阈值参数的量化关系的构建方法为:

[0030] 随着监测时间的推进,根据逐步积累的运行数据,通过数据驱动的方法拟合当前风电场日常运行场景下,评估误差E关于系统扰动 Δp 的函数关系 $f(\Delta p)$,以及评估耗时T关于基准点更新次数N的函数关系 $f(N)$,所述函数为非线性函数或线性函数;系统扰动 Δp 和基准点更新次数N均由阈值参数 D_T 计算得出,由此得到评估误差E和评估耗时T关于阈值参数 D_T 的量化联系,如下所示:

$$[0031] \quad E = f(\Delta p) = f_E(D_T)$$

$$[0032] \quad T = f(N) = f_T(D_T)$$

[0033] 式中: $f_E(D_T)$ 表示评估误差E关于阈值参数 D_T 的函数关系; $f_T(D_T)$ 表示表示评估耗时T关于阈值参数 D_T 的函数关系。

[0034] 所述的步骤S4中,阈值参数优化模型 P_3 在评估误差E和评估耗时T关于阈值参数 D_T 的量化关系的基础上进行构建,模型 P_3 形式如下:

$$[0035] \quad \min_{D_T} \alpha f_E(D_T) + \beta f_T(D_T)$$

$$[0036] \quad \text{s. t. } f_E(D_T) \leq \overline{f_E(D_T)}$$

$$[0037] \quad f_T(D_T) \leq \overline{f_T(D_T)}$$

$$[0038] \quad \underline{D_T} \leq D_T \leq \overline{D_T}$$

[0039] 式中, α 和 β 分别为评估误差E和评估耗时T在优化目标函数中的权重因子,均由风电场运营偏好决定; $\overline{f}_E(D_T)$ 表示评估误差上限; $\overline{f}_T(D_T)$ 表示评估耗时上限; D_T 表示阈值参数下限; \overline{D}_T 表示阈值参数上限;

[0040] 通过求解所建立的参数优化模型 P_3 ,即可得到评估基准点动态更新阈值 D_T 的最优取值,从而使得风电场无功控制能力在线监测方法在实际应用中达到最优性能。

[0041] 本发明具有的有益效果是:本发明建立了风电场无功控制能力在线监测方法,可在运行过程中逐步优化自身阈值参数,实现了风电场无功控制能力在线监测过程中精度要求和速度要求的合理协调。本发明可为风电场无功控制能力在线监测的落地应用提供参考依据。

附图说明

[0042] 图1是风电场无功控制能力在线监测方法技术流程图;

[0043] 图2是评估误差关于系统扰动的非线性关系示意图;

[0044] 图3是评估耗时关于基准点更新次数的近似线性关系示意图;

[0045] 图4是所得最优参数的效果验证示意图。

[0046] 图5是最优参数下风电场无功控制能力在线监测效果示意图

具体实施方式

[0047] 下面结合附图和实施例对本发明做进一步阐述和说明。

[0048] 本发明的一种风电场无功控制能力在线监测方法的原理为:在风电场无功控制能力聚合评估模型和风电场无功控制能力在线监测初步模型的基础上,根据逐步积累的相关运行数据优化自身阈值参数,实现了风电场无功控制能力在线监测过程中精度要求和速度要求的合理协调。该方法具体步骤如下:

[0049] S1:应用于一个新的风电场时,首先结合现场测量互感器测量得到的风电场运行状态信息,构建风电场无功控制能力聚合评估模型。

[0050] 模型 P_1 的形式如下:

$$[0051] \quad Q_{PCC}^{\max} = \max_{Q_i^{WT}, Q_i^c} Q_{PCC}$$

$$[0052] \quad Q_{PCC}^{\min} = \min_{Q_i^{WT}, Q_i^c} Q_{PCC}$$

$$[0053] \quad s. t. \quad f_{PF}(P_i^{WT}, Q_i^{WT}, Q_i^c, P_{ij}^l, Q_{ij}^l, v_i^{WT}, \delta_i^{WT}) = 0$$

$$[0054] \quad h_{safe}(P_i^{WT}, Q_i^{WT}, Q_i^c, P_{ij}^l, Q_{ij}^l, v_i^{WT}, \delta_i^{WT}) \leq 0$$

$$[0055] \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$$

[0056] 式中, Q_i^{WT} 、 Q_i^c 均为优化变量, Q_i^{WT} 表示风电场内部第i台风电机组的无功出力, Q_i^c 表示风电场内部第i组无功补偿装置的无功出力; Q_{PCC}^{\max} 、 Q_{PCC}^{\min} 均为目标函数, Q_{PCC}^{\max} 表示风电场出口无功出力的最大值, Q_{PCC}^{\min} 表示风电场出口无功出力的最小值, Q_{PCC}^{\max} 和 Q_{PCC}^{\min} 的差值即可反映风电场的无功控制能力; Q_{PCC} 表示风电场出口的无功出力; P_i^{WT} 表示第i台风电机

组的有功出力; P_{ij}^l 表示节点 i、j 之间线路的有功潮流; Q_{ij}^l 表示节点 i、j 之间线路的无功潮流; v_i^{WT} 表示第 i 台风电机组接入节点的电压幅值; δ_i^{WT} 表示第 i 台风电机组接入节点的电压相角; n 表示风电场内部风电机组的数量; f_{PF} 表示风电场的潮流约束, h_{safe} 表示风电场的安全约束, 其具体形式如下:

$$[0057] \quad f_{PF}: \begin{cases} P_i - v_i \sum v_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - v_i \sum v_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

$$[0058] \quad h_{safe}: \begin{cases} \underline{Q_i^{WT}} \leq Q_i^{WT} \leq \overline{Q_i^{WT}} \\ \underline{Q_i^c} \leq Q_i^c \leq \overline{Q_i^c} \\ \underline{P_{ij}^l} \leq P_{ij}^l \leq \overline{P_{ij}^l} \\ \underline{Q_{ij}^l} \leq Q_{ij}^l \leq \overline{Q_{ij}^l} \\ \underline{v_i^{WT}} \leq v_i^{WT} \leq \overline{v_i^{WT}} \end{cases}$$

[0059] 式中: G_{ij} 表示节点 i、j 之间的线路电导; B_{ij} 表示节点 i、j 之间的线路电纳; v_i 表示节点 i 的电压幅值; v_j 表示节点 j 的电压幅值; δ_{ij} 表示节点 i、j 之间的相角差; P_i 表示节点 i 的注入有功功率, 由 P_i^{WT} 和节点接入信息决定; Q_i 表示节点 i 的注入无功功率, 由 Q_i^{WT} 、 Q_i^c 和节点接入信息决定; $\underline{Q_i^{WT}}$ 表示第 i 台风电机组的无功出力下限; $\overline{Q_i^{WT}}$ 表示第 i 台风电机组的无功出力上限; $\underline{Q_i^c}$ 表示第 i 组无功补偿装置的无功出力下限; $\overline{Q_i^c}$ 表示第 i 组无功补偿装置的无功出力上限; $\underline{P_{ij}^l}$ 表示节点 i、j 之间线路的有功潮流下限; $\overline{P_{ij}^l}$ 表示节点 i、j 之间线路的有功潮流上限; $\underline{Q_{ij}^l}$ 表示节点 i、j 之间线路的无功潮流下限; $\overline{Q_{ij}^l}$ 表示节点 i、j 之间线路的无功潮流上限; $\underline{v_i^{WT}}$ 表示第 i 台风电机组接入节点电压幅值的下限; $\overline{v_i^{WT}}$ 表示第 i 台风电机组接入节点电压幅值的上限。

[0060] S2: 构建风电场无功控制能力在线监测模型:

[0061] 在线监测初始阶段, 预设一个阈值参数 D_T (根据过往应用经验选取一个相对较小, 优先保证精度, 并不一定最优), 基于模型 P_1 构建风电场无功控制能力在线监测模型 P_2 , 模型 P_2 的形式如下:

$$[0062] \quad Q_{online}^{capability} = \begin{cases} Q_{base}^{capability} + \left. \frac{dQ^{capability}}{dp} \right|_{base} \Delta p & , \text{if } D_i \leq D_T \\ \text{solve } P_1(p_{base} + \Delta p) & , \text{if } D_i > D_T \end{cases}$$

[0063] 式中, $Q_{online}^{capability}$ 为风电场的实时无功控制能力, $Q_{base}^{capability}$ 为风电场在基准点的无功控制能力, Δp 为扰动变化量, $\left. \frac{dQ^{capability}}{dp} \right|_{base}$ 为基准点处风电场无功控制能力相对于系统扰动变量的最优灵敏度; p_{base} 为基准时刻的扰动变量, $\text{solve } P_1(p_{base} + \Delta p)$ 表示求解扰动变量 ($p_{base} + \Delta p$) 下的模型 P_1 ;

[0064] 阈值参数 D_t 为基准点更新判据,用以衡量扰动大小, D_t 选取为当前评估点相对于基准点的欧式距离,表达式如下:

$$[0065] \quad D_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_t^i - p_{base}^i)^2}{N}}$$

[0066] 式中: p_t^i 表示t时刻的第i个扰动变量; p_{base}^i 表示基准时刻的第i个扰动变量;N为扰动变量数目;

[0067] 当更新判据 D_t 不超过阈值 D_T 时,说明扰动较小,可通过最优灵敏度信息进行线性化近似估计;当更新判据 D_t 超过阈值 D_T 时,说明扰动较大,需要重新计算 P_1 ,并更新基准点为当前评估点。

[0068] S3:在风电场无功控制能力聚合评估模型和风电场无功控制能力在线监测模型的基础上,根据逐步积累的运行数据,通过数据驱动的方法,拟合风电场日常运行场景下评估误差和评估耗时分别与阈值参数之间的量化关系。

[0069] 其中,评估误差和评估耗时关于阈值参数的量化关系的构建方法为:

[0070] 随着监测时间的推进,根据逐步积累的运行数据,通过数据驱动的方法拟合当前风电场日常运行场景下,评估误差E关于系统扰动 Δp 的函数关系 $f(\Delta p)$,以及评估耗时T关于基准点更新次数N的函数关系 $f(N)$,所述函数为非线性函数或线性函数;系统扰动 Δp 和基准点更新次数N均由阈值参数 D_T 计算得出,由此得到评估误差E和评估耗时T关于阈值参数 D_T 的量化联系,如下所示:

$$[0071] \quad E = f(\Delta p) = f_E(D_T)$$

$$[0072] \quad T = f(N) = f_T(D_T)$$

[0073] 式中: $f_E(D_T)$ 表示评估误差E关于阈值参数 D_T 的函数关系; $f_T(D_T)$ 表示表示评估耗时T关于阈值参数 D_T 的函数关系。

[0074] S4:根据S3中得到的量化关系,构建阈值参数优化模型并加以求解,最终得到评估基准点动态更新阈值的最优取值,使风电场无功控制能力在线监测达到最优性能。

[0075] 其中,阈值参数优化模型 P_3 在评估误差E和评估耗时T关于阈值参数 D_T 的量化关系的基础上进行构建,模型 P_3 形式如下:

$$[0076] \quad \min_{D_T} \alpha f_E(D_T) + \beta f_T(D_T)$$

$$[0077] \quad \text{s. t. } f_E(D_T) \leq \overline{f_E(D_T)}$$

$$[0078] \quad f_T(D_T) \leq \overline{f_T(D_T)}$$

$$[0079] \quad \underline{D_T} \leq D_T \leq \overline{D_T}$$

[0080] 式中, α 和 β 分别为评估误差E和评估耗时T在优化目标函数中的权重因子,均由风电场运营偏好决定; $\overline{f_E(D_T)}$ 表示评估误差上限; $\overline{f_T(D_T)}$ 表示评估耗时上限; $\underline{D_T}$ 表示阈值参数下限; $\overline{D_T}$ 表示阈值参数上限;

[0081] 通过求解所建立的参数优化模型 P_3 ,即可得到评估基准点动态更新阈值 D_T 的最优取值,从而使得风电场无功控制能力在线监测方法在实际应用中达到最优性能。

[0082] 下面将上述方法应用于一个具体的实施例中,以展示其技术效果,其具体的步骤如前所述,不再赘述。

[0083] 实施例

[0084] 下面本发明以国内某实际风电场作为实施例,具体阐述本发明的应用效果。该风电场包含33台额定功率1.5MW的双馈风电机组,并接入到一个经过适当修改后的IEEE-9节点电力系统。选择2019年5月18日这一天的实测数据作为测试数据,其中包括风电场内部各台风机的实测风速(每5分钟一个测量点,一共288个测量点)和各台风电机组的实时有功出力。

[0085] 图1展示了本发明内容的实施流程。在风电场无功控制能力聚合评估模型和风电场无功控制能力在线监测模型的基础上,根据逐步积累的相关运行数据,通过数据驱动的方法拟合风电场日常运行场景下评估误差和评估耗时关于阈值参数的量化关系。其中,评估误差关于系统扰动的非线性关系如图2所示,评估耗时关于基准点更新次数的近似线性关系如图3所示。基于上述结果,构建阈值参数优化模型并加以求解。其中,评估误差和评估耗时在优化目标函数中的权重因子均设为0.5,最终得到评估基准点动态更新阈值的最优取值为0.4。图4给出了评估误差E和评估耗时T关于阈值参数 D_T 的实际仿真结果,其中选取了若干个典型阈值参数(0.05,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,2.0)进行测试,可以看出0.4是一个相对最优的参数取值,这一结论验证了本发明所构建的阈值参数优化模型的正确性。图5给出了最优参数下风电场无功控制能力在线监测方法的运行结果,可以看出该方法取得了非常好的监测效果。

[0086] 综上所述,本发明所提的风电场无功控制能力在线监测方法能够实现风电场无功控制能力在线监测过程中精度要求和速度要求的合理协调,从而达到最优的在线监测性能,具有十分重要的落地应用价值。

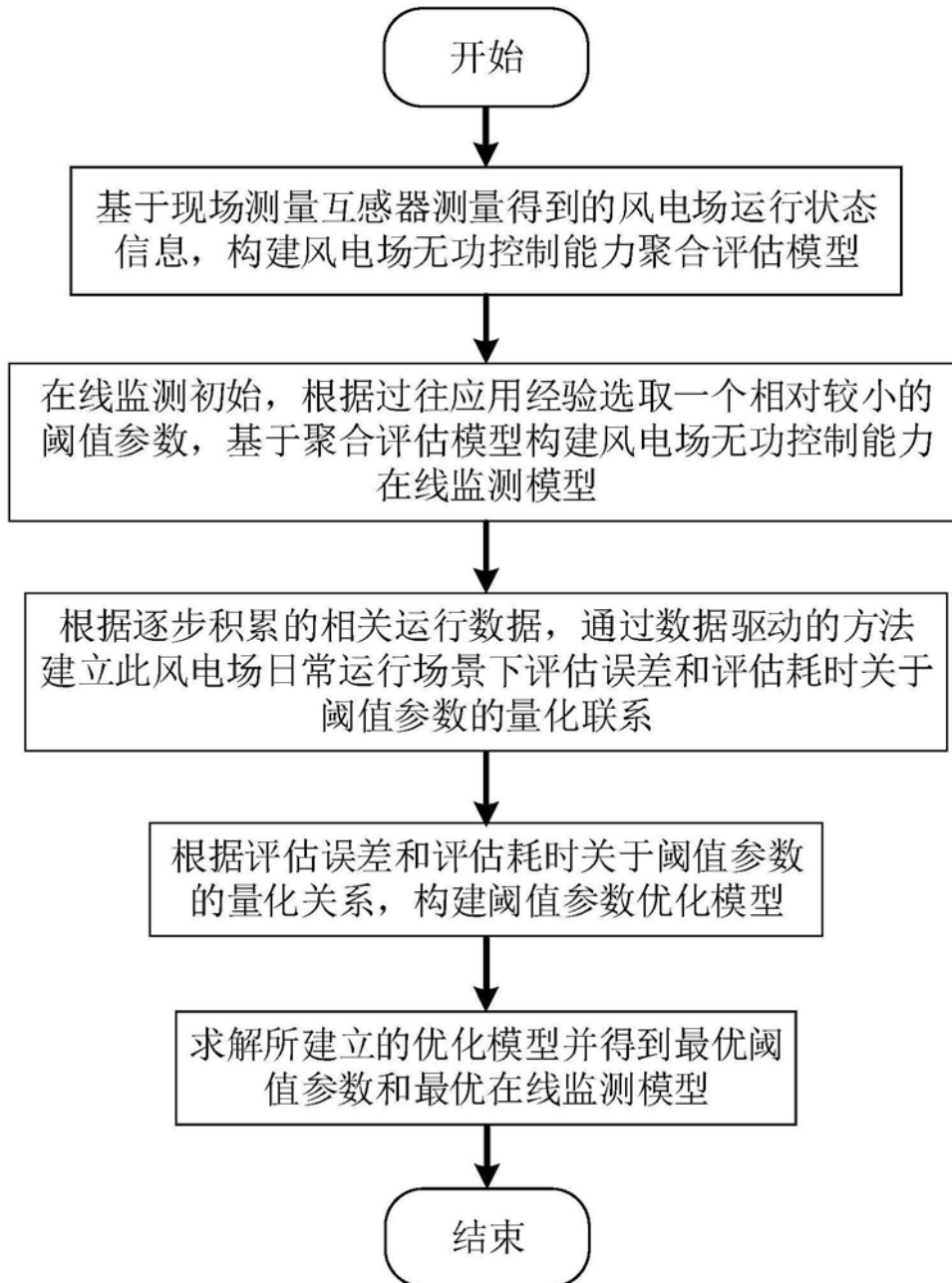


图1

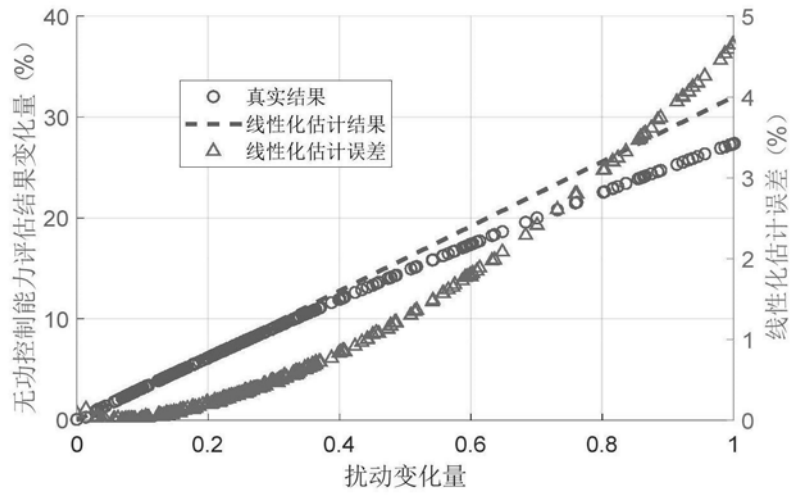


图2

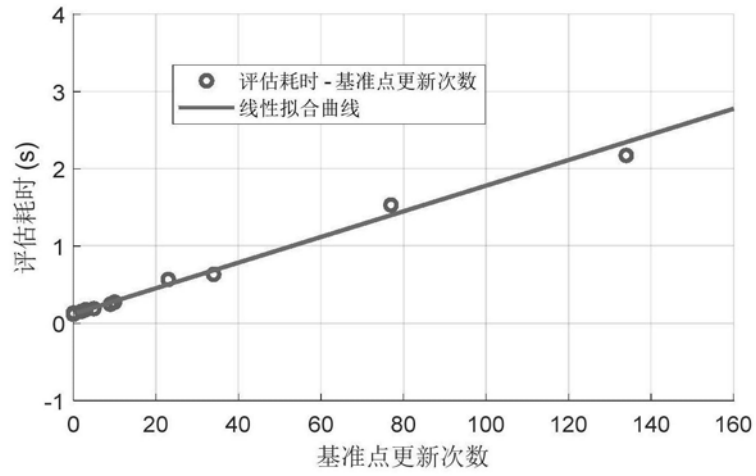


图3

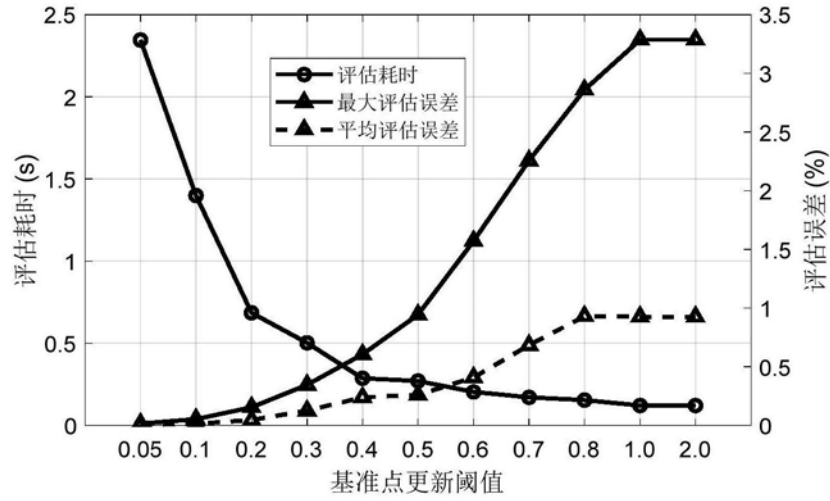


图4

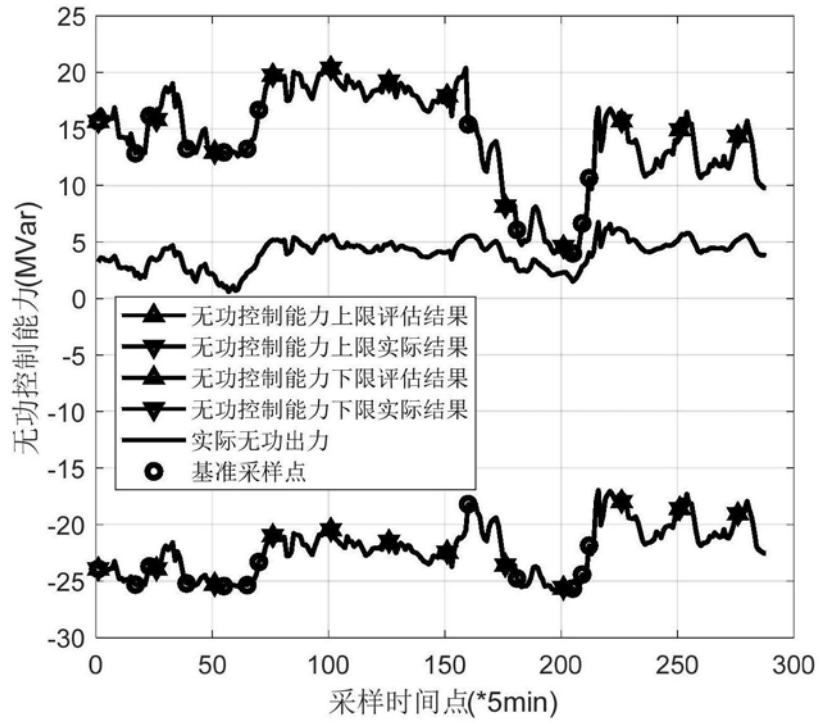


图5