



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107482639 A

(43)申请公布日 2017.12.15

(21)申请号 201710592417.5

H02J 3/38(2006.01)

(22)申请日 2017.07.19

(71)申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园1号

申请人 国家电网公司

国网冀北电力有限公司

(72)发明人 孙宏斌 刘海涛 郭庆来 杜延菱

王彬 于德明 牛涛 徐忱

张伯明 吴文传 蒋芒

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所(普通合伙) 11201

代理人 罗文群

(51)Int.Cl.

H02J 3/16(2006.01)

H02J 3/50(2006.01)

权利要求书4页 说明书8页

(54)发明名称

适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法

(57)摘要

本发明涉及一种适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法,属于电力系统安全和控制技术领域。首先,各个风电场计算场内所有风电机组无功调节范围和所有动态无功设备的无功功率调节范围,并将计算结果送至风电汇集站;然后,风电汇集站基于当前各个风电场运行状态,生成N个模拟场景,计算出这N个模拟场景下的安全裕度;接着,根据每个场景对应的风电场汇集区域安全裕度,拟合出动态无功设备无功值调节量与风电场汇集区域安全裕度的关系式;最后,基于动态无功设备无功值调节量与风电场汇集区域安全裕度的关系式,计算出当前状态下各个动态无功设备最优的无功设定值。该动态无功储备优化方法可以有效增加风电汇集区域的安全裕度。

1. 一种适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法,其特征在于该方法包括以下步骤:

(1) 计算电网中风电系统的各风电场内所有风电机组的无功功率调节范围和所有动态无功设备的无功功率的调节范围,过程如下:

分别建立计算电网中风电系统侧第k个风电场的所有风电机组的无功功率调节量上限值 $\overline{\Delta Q_{G,k}}$ 、所有风电机组的无功功率调节量下限值 $\underline{\Delta Q_{G,k}}$ 、所有动态无功设备的无功功率调节量上限值 $\overline{\Delta Q_{D,k}}$ 、所有动态无功设备的无功功率调节量下限值 $\underline{\Delta Q_{D,k}}$ 的目标函数如下:

$$\begin{aligned}\overline{\Delta Q_{G,k}} &= \max_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{G,k,j}} \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i} \\ \underline{\Delta Q_{G,k}} &= \min_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{G,k,j}} \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i} \\ \overline{\Delta Q_{D,k}} &= \max_{\Delta q_{D,k,i}, \Delta q_{D,k,j}} \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j} \\ \underline{\Delta Q_{D,k}} &= \min_{\Delta q_{D,k,i}, \Delta q_{D,k,j}} \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j}\end{aligned}$$

其中, $N_{G,k}$ 与 $N_{D,k}$ 分别为风电系统侧第k个风电场中风电机组和动态无功设备的数量, $\Delta q_{G,k,i}$ 为第k个风电场中第i个风电机组的无功功率变化量, $\Delta q_{D,k,j}$ 表示第k个风电场中第j个动态无功设备的无功功率变化量;

上述目标函数的约束条件如下:

当前状态下风电场母线电压的约束条件为:

$$\underline{V}_k \leq V_k + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{V}_k$$

其中, $s_{G,k,m}$ 和 $s_{D,k,n}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对该风电场母线电压的灵敏度系数, $V_k$ 表示当前状态下第k个风电场母线电压值, $\underline{V}_k$ 和 $\overline{V}_k$ 分别表示第k个风电场母线电压值的下限值与上限值;

当前状态下风电机组机端电压的约束条件为:

$$\underline{v}_{G,k,i} \leq v_{G,k,i} + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} c_{G,k,m,i} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} c_{D,k,n,i} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{v}_{G,k,i}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

其中, $c_{G,k,m,i}$ 和 $c_{D,k,n,i}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对第i个风电机组的电压的灵敏度系数, $v_{G,k,i}$ 表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压值, $\underline{v}_{G,k,i}$ 和 $\overline{v}_{G,k,i}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压下限值与上限值;

第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力约束条件为:

$$\underline{\Delta q_{G,k,i}} \leq \Delta q_{G,k,i} \leq \overline{\Delta q_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

其中, $\underline{\Delta q_{G,k,i}}$ 和 $\overline{\Delta q_{G,k,i}}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力调节量的

下限值与上限值；

第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力约束条件为：

$$\underline{\Delta q_{D,k,j}} \leq \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{\Delta q_{D,k,j}}, \quad j=1,2,\dots,N_{D,k}$$

其中， $\underline{\Delta q_{D,k,j}}$ 和 $\overline{\Delta q_{D,k,j}}$ 分别表示第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力调节量的下限值与上限值；

(2) 根据电网中风电系统中风电汇集站记录的当前各风电场的运行状态，生成N个模拟场景，N为风电场汇集站区域内风电场的个数，并计算N个模拟场景下的安全裕度，包括以下步骤：

(2-1) 根据当前各风电场的运行状态，风电汇集站生成N个模拟场景，利用下式，计算其中任意第t个模拟场景的无功功率， $t=1,2,\dots,N$ ：

$$Q_{G,k}^t = Q_{G,k}, \quad Q_{D,k}^t = \begin{cases} Q_{D,k} + 0.1\overline{\Delta Q_{D,k}}, & t=k \\ Q_{D,k}, & t \neq k \end{cases}$$

其中， $Q_{G,k}^t$ 表示第t个模拟场景中第k个风电场的所有风电机组无功功率总和， $Q_{D,k}^t$ 表示第t个模拟场景中第k个风电场的所有动态无功设备无功功率总和， $Q_{G,k}$ 表示第k个风电场的所有风电机组无功功率总和的当前值， $Q_{D,k}$ 表示第k个风电场的所有动态无功设备无功功率总和的当前值；

(2-2) 利用牛顿-拉夫逊潮流计算方法，根据上述步骤(2-1)的N个模拟场景，计算每个风电场的潮流分布，得到第t个模拟场景中第k个风电场的母线电压值 $V_k^t$ ， $t=1,2,\dots,N$ ， $k=1,2,\dots,N$ ， $R^t$ 表示第t个模拟场景中的安全裕度， $R^t$ 的计算公式如下：

$$R^t = \sum_{k=1}^N \left( \left| V_k^t - \overline{V}_k \right| + \left| V_k^t - \underline{V}_k \right| - \left| \overline{V}_k - \underline{V}_k \right| \right)$$

(2-3) 重复步骤(2-2)，分别得到与各模拟场景相对应的风电场汇集区域的安全裕度；

(3) 根据上述与各模拟场景相对应的风电场汇集区域的安全裕度，拟合得到风电场的所有动态无功设备的无功功率调节量总和与风电场汇集区域安全裕度的关系如下：

$$R = \sum_{k=1}^N (a_k \Delta Q_{D,k} + b_k)$$

其中，R表示风电场汇集的区域安全裕度， $a_k$ 和 $b_k$ 为拟合得到的回归系数， $a_k$ 和 $b_k$ 通过下式计算得到：

$$\min_{a_k, b_k} \sum_{t=1}^N \left| R^t - 10a_t - \sum_{k=1}^N b_k \right|^2 ;$$

(4) 根据上述安全裕度的关系，计算当前状态下风电场中各动态无功设备的无功功率设定值，包括以下步骤：

(4-1) 分别建立各风电场中所有动态无功设备的最优无功功率调节量总和、所有风电机组最优无功功率调节量总和的目标函数如下：

$$\min_{\Delta Q_{D,k}, \Delta Q_{G,k}} \sum_{k=1}^N (a_k \Delta Q_{D,k} + b_k)$$

上述目标函数的约束条件如下：

当前状态下各风电场的母线电压的约束条件为：

$$\underline{V}_l \leq V_l + \sum_{k=1}^N H_{G,k,l} \Delta Q_{G,k} + \sum_{k=1}^N H_{D,k,l} \Delta Q_{D,k} \leq \overline{V}_l, \quad l=1,2,\dots,N$$

其中， $H_{G,k,l}$ 表示风电场汇集站区域内第k个风电场的风电机组无功功率对第l个风电场母线电压的灵敏度系数， $H_{D,k,l}$ 表示风电场汇集站区域内第k个风电场的动态无功设备无功功率对第l个风电场母线电压的灵敏度系数， $V_l$ 表示当前状态下第l个风电场的母线电压值， $\underline{V}_l$ 和 $\overline{V}_l$ 分别表示第l个风电场母线电压值的下限值与上限值；

第k个风电场的所有动态无功设备的无功功率总和的约束条件为：

$$\underline{\Delta Q_{D,k}} \leq \Delta Q_{D,k} \leq \overline{\Delta Q_{D,k}}$$

第k个风电场的所有风电机组的无功功率总和的约束条件为：

$$\underline{\Delta Q_{G,k}} \leq \Delta Q_{G,k} \leq \overline{\Delta Q_{G,k}}$$

根据约束条件，求解上述目标函数，得到风电场中所有动态无功设备的最优无功功率调节量总和 $\Delta Q_{D,k}^*$ 和所有风电机组最优无功功率调节量总和 $\Delta Q_{G,k}^*$ ，风电场汇集站区域将计算结果发送给各个风电场；

(4-2) 分别建立计算各风电场内每个动态无功设备的无功功率设定值的目标函数如下：

$$\min_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{D,k,j}} \left( \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \right)^2$$

上述目标函数的约束条件如下：

当前状态下风电场母线电压的约束条件为：

$$\underline{V}_k \leq V_k + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{V}_k$$

其中， $s_{G,k,m}$ 和 $s_{D,k,n}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对该风电场母线电压的灵敏度系数， $V_k$ 表示当前状态下第k个风电场母线电压值， $\underline{V}_k$ 和 $\overline{V}_k$ 分别表示第k个风电场母线电压值的下限值与上限值；

当前状态下风电机组机端电压的约束条件为：

$$\underline{v_{G,k,i}} \leq v_{G,k,i} + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} c_{G,k,m,i} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} c_{D,k,n,i} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{v_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

其中， $c_{G,k,m,i}$ 和 $c_{D,k,n,i}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对第i个风电机组的电压的灵敏度系数， $v_{G,k,i}$ 表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压值， $\underline{v_{G,k,i}}$ 和 $\overline{v_{G,k,i}}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压下限值与上限值；

第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力约束条件为：

$$\underline{\Delta q_{G,k,i}} \leq \Delta q_{G,k,i} \leq \overline{\Delta q_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

其中， $\underline{\Delta q_{G,k,i}}$ 和 $\overline{\Delta q_{G,k,i}}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力调节量的

下限值与上限值；

第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力约束条件为：

$$\Delta q_{D,k,j} \leq \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{\Delta q_{D,k,j}}, \quad j=1,2,\dots,N_{D,k}$$

其中， $\Delta q_{D,k,j}$ 和 $\overline{\Delta q_{D,k,j}}$ 分别表示第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力调节量的下限值与上限值；

第k个风电场所有风电机组的无功功率值总和约束条件为：

$$\sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i} = \Delta Q_{G,k}^*$$

第k个风电场所有动态无功设备的无功功率值总和约束条件为：

$$\sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j} = \Delta Q_{D,k}^*$$

根据上述步骤(4-1)的计算结果和上述约束条件，求解上述目标函数，分别得到风电场中各动态无功设备的最优无功功率调节量的 $\Delta q_{D,k,j}^*$ ，实现电网中风电系统的动态无功设备无功功率的优化。

## 适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法,属于电力系统安全和控制技术领域。

### 背景技术

[0002] 我国张北地区千万千瓦级大规模风电馈入弱送端电力系统,出力随机波动强,运行特性非常复杂。而部分风电汇集区域动态无功储备不够,因此电压安全问题突出,在严重故障下的安全问题尤为显著。而动态无功储备能够在电网发生扰动后提供快速无功电压支撑,保障电网安全。由此可见,如何在线优化大规模风电系统的动态无功储备,保障电网安全运行,是十分必要的。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的是提出一种适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法。基于已有技术的背景,解决针对大规模风电系统的动态无功储备在线优化问题,以确保电网发生扰动后,仍能维持稳定运行,显著提高用电可靠性。

[0004] 本发明提出的适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法,包括以下步骤:

[0005] (1) 计算电网中风电系统的各风电场内所有风电机组的无功功率调节范围和所有动态无功设备的无功功率的调节范围,过程如下:

[0006] 分别建立计算电网中风电系统侧第k个风电场的所有风电机组的无功功率调节量上限值 $\overline{\Delta Q_{G,k}}$ 、所有风电机组的无功功率调节量下限值 $\underline{\Delta Q_{G,k}}$ 、所有动态无功设备的无功功率调节量上限值 $\overline{\Delta Q_{D,k}}$ 、所有动态无功设备的无功功率调节量下限值 $\underline{\Delta Q_{D,k}}$ 的目标函数如下:

$$[0007] \quad \overline{\Delta Q_{G,k}} = \max_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{G,k,j}} \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i}$$

$$[0008] \quad \underline{\Delta Q_{G,k}} = \min_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{G,k,j}} \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i}$$

$$[0009] \quad \overline{\Delta Q_{D,k}} = \max_{\Delta q_{D,k,i}, \Delta q_{D,k,j}} \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j}$$

$$[0010] \quad \underline{\Delta Q_{D,k}} = \min_{\Delta q_{D,k,i}, \Delta q_{D,k,j}} \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j}$$

[0011] 其中, $N_{G,k}$ 与 $N_{D,k}$ 分别为风电系统侧第k个风电场中风电机组和动态无功设备的数量, $\Delta q_{G,k,i}$ 为第k个风电场中第i个风电机组的无功功率变化量, $\Delta q_{D,k,j}$ 表示第k个风电场中第j个动态无功设备的无功功率变化量;

[0012] 上述目标函数的约束条件如下：

[0013] 当前状态下风电场母线电压的约束条件为：

$$[0014] \quad \underline{V}_k \leq V_k + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{V}_k$$

[0015] 其中， $s_{G,k,m}$ 和 $s_{D,k,n}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对该风电场母线电压的灵敏度系数， $V_k$ 表示当前状态下第k个风电场母线电压值， $\underline{V}_k$ 和 $\overline{V}_k$ 分别表示第k个风电场母线电压值的下限值与上限值；

[0016] 当前状态下风电机组机端电压的约束条件为：

$$[0017] \quad \underline{v}_{G,k,i} \leq v_{G,k,i} + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} c_{G,k,m,i} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} c_{D,k,m,i} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{v}_{G,k,i}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0018] 其中， $c_{G,k,m,i}$ 和 $c_{D,k,n,i}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对第i个风电机组的电压的灵敏度系数， $v_{G,k,i}$ 表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压值， $\underline{v}_{G,k,i}$ 和 $\overline{v}_{G,k,i}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压下限值与上限值；

[0019] 第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力约束条件为：

$$[0020] \quad \underline{\Delta q_{G,k,i}} \leq \Delta q_{G,k,i} \leq \overline{\Delta q_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0021] 其中， $\underline{\Delta q_{G,k,i}}$ 和 $\overline{\Delta q_{G,k,i}}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力调节量的下限值与上限值；

[0022] 第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力约束条件为：

$$[0023] \quad \underline{\Delta q_{D,k,j}} \leq \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{\Delta q_{D,k,j}}, \quad j=1,2,\dots,N_{D,k}$$

[0024] 其中， $\underline{\Delta q_{D,k,j}}$ 和 $\overline{\Delta q_{D,k,j}}$ 分别表示第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力调节量的下限值与上限值；

[0025] (2) 根据电网中风电系统中风电汇集站记录的当前各风电场的运行状态，生成N个模拟场景，N为风电场汇集站区域内风电场的个数，并计算N个模拟场景下的安全裕度，包括以下步骤：

[0026] (2-1) 根据当前各风电场的运行状态，风电汇集站生成N个模拟场景，利用下式，计算其中任意第t个模拟场景的无功功率， $t=1,2,\dots,N$ ：

$$[0027] \quad Q'_{G,k} = Q_{G,k}, \quad Q'_{D,k} = \begin{cases} Q_{D,k} + 0.1\Delta Q_{D,k}, & t=k \\ Q_{D,k}, & t \neq k \end{cases}$$

[0028] 其中， $Q'_{G,k}$ 表示第t个模拟场景中第k个风电场的所有风电机组无功功率总和， $Q'_{D,k}$ 表示第t个模拟场景中第k个风电场的所有动态无功设备无功功率总和， $Q_{G,k}$ 表示第k个风电场的所有风电机组无功功率总和的当前值， $Q_{D,k}$ 表示第k个风电场的所有动态无功设备无功功率总和的当前值；

[0029] (2-2) 利用牛顿-拉夫逊潮流计算方法，根据上述步骤(2-1)的N个模拟场景，计算每个风电场的潮流分布，得到第t个模拟场景中第k个风电场的母线电压值 $V_k^t$ ， $t=1,2,\dots,N$ ， $k=1,2,\dots,N$ ， $R^t$ 表示第t个模拟场景中的安全裕度， $R_t$ 的计算公式如下：

$$[0030] \quad R^t = \sum_{k=1}^N \left( \left| V_k^t - \overline{V}_k \right| + \left| V_k^t - \underline{V}_k \right| - \left| \overline{V}_k - \underline{V}_k \right| \right)$$

[0031] (2-3) 重复步骤 (2-2), 分别得到与各模拟场景相对应的风电场汇集区域的安全裕度;

[0032] (3) 根据上述与各模拟场景相对应的风电场汇集区域的安全裕度, 拟合得到风电场的所有动态无功设备的无功功率调节量总和与风电场汇集区域安全裕度的关系如下:

$$[0033] \quad R = \sum_{k=1}^N (a_k \Delta Q_{D,k} + b_k)$$

[0034] 其中, R 表示风电场汇集的区域安全裕度,  $a_k$  和  $b_k$  为拟合得到的回归系数,  $a_k$  和  $b_k$  通过下式计算得到:

$$[0035] \quad \min_{a_k, b_k} \sum_{t=1}^N \left| R^t - 10a_t - \sum_{k=1}^N b_k \right|^2;$$

[0036] (4) 根据上述安全裕度的关系, 计算当前状态下风电场中各动态无功设备的无功功率设定值, 包括以下步骤:

[0037] (4-1) 分别建立各风电场中所有动态无功设备的最优无功功率调节量总和、所有风电机组最优无功功率调节量总和的目标函数如下:

$$[0038] \quad \min_{\Delta Q_{D,k}, \Delta Q_{G,k}} \sum_{k=1}^N (a_k \Delta Q_{D,k} + b_k)$$

[0039] 上述目标函数的约束条件如下:

[0040] 当前状态下各风电场的母线电压的约束条件为:

$$[0041] \quad \underline{V}_l \leq V_l + \sum_{k=1}^N H_{G,k,l} \Delta Q_{G,k} + \sum_{k=1}^N H_{D,k,l} \Delta Q_{D,k} \leq \overline{V}_l, \quad l=1, 2, \dots, N$$

[0042] 其中,  $H_{G,k,l}$  表示风电场汇集站区域内第 k 个风电场的风电机组无功功率对第 l 个风电场母线电压的灵敏度系数,  $H_{D,k,l}$  表示风电场汇集站区域内第 k 个风电场的动态无功设备无功功率对第 l 个风电场母线电压的灵敏度系数,  $V_l$  表示当前状态下第 l 个风电场的母线电压值,  $\underline{V}_l$  和  $\overline{V}_l$  分别表示第 l 个风电场母线电压值的下限值与上限值;

[0043] 第 k 个风电场的所有动态无功设备的无功功率总和的约束条件为:

$$[0044] \quad \underline{\Delta Q_{D,k}} \leq \Delta Q_{D,k} \leq \overline{\Delta Q_{D,k}}$$

[0045] 第 k 个风电场的所有风电机组的无功功率总和的约束条件为:

$$[0046] \quad \underline{\Delta Q_{G,k}} \leq \Delta Q_{G,k} \leq \overline{\Delta Q_{G,k}}$$

[0047] 根据约束条件, 求解上述目标函数, 得到风电场中所有动态无功设备的最优无功功率调节量总和  $\Delta Q_{D,k}^*$  和所有风电机组最优无功功率调节量总和  $\Delta Q_{G,k}^*$ , 风电场汇集站区域将计算结果发送给各个风电场;

[0048] (4-2) 分别建立计算各风电场内每个动态无功设备的无功功率设定值的目标函数如下:

$$[0049] \quad \min_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{D,k,j}} \left( \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \right)^2$$



[0050] 上述目标函数的约束条件如下：

[0051] 当前状态下风电场母线电压的约束条件为：

$$[0052] \quad \underline{V}_k \leq V_k + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{V}_k$$

[0053] 其中， $s_{G,k,m}$ 和 $s_{D,k,n}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对该风电场母线电压的灵敏度系数， $V_k$ 表示当前状态下第k个风电场母线电压值， $\underline{V}_k$ 和 $\overline{V}_k$ 分别表示第k个风电场母线电压值的下限值与上限值；

[0054] 当前状态下风电机组机端电压的约束条件为：

$$[0055] \quad \underline{v}_{G,k,i} \leq v_{G,k,i} + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} c_{G,k,m,i} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} c_{D,k,n,i} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{v}_{G,k,i}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0056] 其中， $c_{G,k,m,i}$ 和 $c_{D,k,n,i}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对第i个风电机组的电压的灵敏度系数， $v_{G,k,i}$ 表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压值， $\underline{v}_{G,k,i}$ 和 $\overline{v}_{G,k,i}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压下限值与上限值；

[0057] 第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力约束条件为：

$$[0058] \quad \underline{\Delta q_{G,k,i}} \leq \Delta q_{G,k,i} \leq \overline{\Delta q_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0059] 其中， $\underline{\Delta q_{G,k,i}}$ 和 $\overline{\Delta q_{G,k,i}}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力调节量的下限值与上限值；

[0060] 第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力约束条件为：

$$[0061] \quad \underline{\Delta q_{D,k,j}} \leq \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{\Delta q_{D,k,j}}, \quad j=1,2,\dots,N_{D,k}$$

[0062] 其中， $\underline{\Delta q_{D,k,j}}$ 和 $\overline{\Delta q_{D,k,j}}$ 分别表示第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力调节量的下限值与上限值；

[0063] 第k个风电场所有风电机组的无功功率值总和约束条件为：

$$[0064] \quad \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i} = \Delta Q_{G,k}^*$$

[0065] 第k个风电场所有动态无功设备的无功功率值总和约束条件为：

$$[0066] \quad \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j} = \Delta Q_{D,k}^*$$

[0067] 根据上述步骤(4-1)的计算结果和上述约束条件，求解上述目标函数，分别得到风电场中各动态无功设备的最优无功功率调节量的 $\Delta q_{D,k,j}^*$ ，实现适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化。

[0068] 本发明提出的适用于大规模风电系统的动态无功储备优化方法，其优点是：

[0069] 本发明方法解决了大规模风电系统的动态无功储备在线优化问题，确保电网发生扰动后，仍能维持稳定运行，因此显著提高用电可靠性。而且本发明方法可以在线优化大规模风电系统的动态无功储备配置，计算速度快，可以很大程度地提高电网运行的稳定性与可靠性。

### 具体实施方式

[0070] 本发明提出的适用于电网中风电系统的动态无功设备无功功率优化方法,包括以下步骤:

[0071] (1) 计算电网中风电系统的各风电场内所有风电机组的无功功率调节范围和所有动态无功设备(例如静态无功功率补偿器、静态无功功率发生器等等)的无功功率的调节范围,过程如下:

[0072] 分别建立计算电网中风电系统侧第k个风电场的所有风电机组的无功功率调节量上限值 $\overline{\Delta Q_{G,k}}$ 、所有风电机组的无功功率调节量下限值 $\underline{\Delta Q_{G,k}}$ 、所有动态无功设备的无功功率调节量上限值 $\overline{\Delta Q_{D,k}}$ 、所有动态无功设备的无功功率调节量下限值 $\underline{\Delta Q_{D,k}}$ 的目标函数如下:

$$[0073] \quad \overline{\Delta Q_{G,k}} = \max_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{G,k,j}} \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i}$$

$$[0074] \quad \underline{\Delta Q_{G,k}} = \min_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{G,k,j}} \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i}$$

$$[0075] \quad \overline{\Delta Q_{D,k}} = \max_{\Delta q_{D,k,j}} \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j}$$

$$[0076] \quad \underline{\Delta Q_{D,k}} = \min_{\Delta q_{D,k,j}} \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j}$$

[0077] 其中, $N_{G,k}$ 与 $N_{D,k}$ 分别为风电系统侧第k个风电场中风电机组和动态无功设备的数量, $\Delta q_{G,k,i}$ 为第k个风电场中第i个风电机组的无功功率变化量, $\Delta q_{D,k,j}$ 表示第k个风电场中第j个动态无功设备的无功功率变化量;

[0078] 上述目标函数的约束条件如下:

[0079] 当前状态下风电场母线电压的约束条件为:

$$[0080] \quad \underline{V}_k \leq V_k + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{V}_k$$

[0081] 其中, $s_{G,k,m}$ 和 $s_{D,k,n}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对该风电场母线电压的灵敏度系数, $V_k$ 表示当前状态下第k个风电场母线电压值, $\underline{V}_k$ 和 $\overline{V}_k$ 分别表示第k个风电场母线电压值的下限值与上限值;

[0082] 当前状态下风电机组机端电压的约束条件为:

$$[0083] \quad \underline{v}_{G,k,i} \leq v_{G,k,i} + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} c_{G,k,m,i} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} c_{D,k,n,i} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{v}_{G,k,i}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0084] 其中, $c_{G,k,m,i}$ 和 $c_{D,k,n,i}$ 分别表示第k个风电场中第m个风电机组和第n个动态无功设备的无功功率对第i个风电机组的电压的灵敏度系数, $v_{G,k,i}$ 表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压值, $\underline{v}_{G,k,i}$ 和 $\overline{v}_{G,k,i}$ 分别表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压下限值与上限值;

[0085] 第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力约束条件为:

$$[0086] \quad \underline{\Delta q_{G,k,i}} \leq \Delta q_{G,k,i} \leq \overline{\Delta q_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0087] 其中,  $\underline{\Delta q_{G,k,i}}$  和  $\overline{\Delta q_{G,k,i}}$  分别表示第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力调节量的下限值与上限值;

[0088] 第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力约束条件为:

$$[0089] \quad \underline{\Delta q_{D,k,j}} \leq \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{\Delta q_{D,k,j}}, \quad j=1,2,\dots,N_{D,k}$$

[0090] 其中,  $\underline{\Delta q_{D,k,j}}$  和  $\overline{\Delta q_{D,k,j}}$  分别表示第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力调节量的下限值与上限值;

[0091] (2) 根据电网中风电系统中风电汇集站记录的当前各风电场的运行状态,生成N个模拟场景,N为风电场汇集站区域内风电场的个数,并计算N个模拟场景下的安全裕度,包括以下步骤:

[0092] (2-1) 根据当前各风电场的运行状态,风电汇集站生成N个模拟场景,利用下式,计算其中任意第t个模拟场景的无功功率,  $t=1,2,\dots,N$ :

$$[0093] \quad Q_{G,k}^t = Q_{G,k}, \quad Q_{D,k}^t = \begin{cases} Q_{D,k} + 0.1\overline{\Delta Q_{D,k}}, & t=k \\ Q_{D,k}, & t \neq k \end{cases}$$

[0094] 其中,  $Q_{G,k}^t$  表示第t个模拟场景中第k个风电场的所有风电机组无功功率总和,  $Q_{D,k}^t$  表示第t个模拟场景中第k个风电场的所有动态无功设备无功功率总和,  $Q_{G,k}$  表示第k个风电场的所有风电机组无功功率总和的当前值,  $Q_{D,k}$  表示第k个风电场的所有动态无功设备无功功率总和的当前值;

[0095] (2-2) 利用牛顿-拉夫逊潮流计算方法,根据上述步骤(2-1)的N个模拟场景,计算每个风电场的潮流分布,得到第t个模拟场景中第k个风电场的母线电压值  $V_k^t$ ,  $t=1,2,\dots,N$ ,  $k=1,2,\dots,N$ ,  $R^t$  表示第t个模拟场景中的安全裕度,  $R^t$  的计算公式如下:

$$[0096] \quad R^t = \sum_{k=1}^N \left( \left| V_k^t - \overline{V_k} \right| + \left| V_k^t - \underline{V_k} \right| - \left| \overline{V_k} - \underline{V_k} \right| \right)$$

[0097] (2-3) 重复步骤(2-2),分别得到与各模拟场景相对应的风电场汇集区域的安全裕度;

[0098] (3) 根据上述与各模拟场景相对应的风电场汇集区域的安全裕度,拟合得到风电场的所有动态无功设备的无功功率调节量总和与风电场汇集区域安全裕度的关系如下:

$$[0099] \quad R = \sum_{k=1}^N (a_k \Delta Q_{D,k} + b_k)$$

[0100] 其中,  $R$  表示风电场汇集的区域安全裕度,  $a_k$  和  $b_k$  为拟合得到的回归系数,  $a_k$  和  $b_k$  通过下式计算得到:

$$[0101] \quad \min_{a_k, b_k} \sum_{t=1}^N \left| R^t - 10a_t - \sum_{k=1}^N b_k \right|^2;$$

[0102] (4) 根据上述安全裕度的关系,计算当前状态下风电场中各动态无功设备的无功

功率设定值,包括以下步骤:

[0103] (4-1) 分别建立各风电场中所有动态无功设备的最优无功功率调节量总和、所有风电机组最优无功功率调节量总和的目标函数如下:

$$[0104] \quad \min_{\Delta Q_{D,k}, \Delta Q_{G,k}} \sum_{k=1}^N (a_k \Delta Q_{D,k} + b_k)$$

[0105] 上述目标函数的约束条件如下:

[0106] 当前状态下各风电场的母线电压的约束条件为:

$$[0107] \quad \underline{V}_l \leq V_l + \sum_{k=1}^N H_{G,k,l} \Delta Q_{G,k} + \sum_{k=1}^N H_{D,k,l} \Delta Q_{D,k} \leq \overline{V}_l, \quad l=1,2,\dots,N$$

[0108] 其中,  $H_{G,k,l}$  表示风电场汇集站区域内第  $k$  个风电场的风电机组无功功率对第  $l$  个风电场母线电压的灵敏度系数,  $H_{D,k,l}$  表示风电场汇集站区域内第  $k$  个风电场的动态无功设备无功功率对第  $l$  个风电场母线电压的灵敏度系数,  $V_l$  表示当前状态下第  $l$  个风电场的母线电压值,  $\underline{V}_l$  和  $\overline{V}_l$  分别表示第  $l$  个风电场母线电压值的下限值与上限值, 由电网或国家标准给定;

[0109] 第  $k$  个风电场的所有动态无功设备的无功功率总和的约束条件为:

$$[0110] \quad \underline{\Delta Q_{D,k}} \leq \Delta Q_{D,k} \leq \overline{\Delta Q_{D,k}}$$

[0111] 第  $k$  个风电场的所有风电机组的无功功率总和的约束条件为:

$$[0112] \quad \underline{\Delta Q_{G,k}} \leq \Delta Q_{G,k} \leq \overline{\Delta Q_{G,k}}$$

[0113] 根据约束条件, 求解上述目标函数, 得到风电场中所有动态无功设备的最优无功功率调节量总和  $\Delta Q_{D,k}^*$  和所有风电机组最优无功功率调节量总  $\Delta Q_{G,k}^*$ , 风电场汇集站区域将计算结果发送给各个风电场;

[0114] (4-2) 分别建立计算各风电场内每个动态无功设备的无功功率设定值的目标函数如下:

$$[0115] \quad \min_{\Delta q_{G,k,i}, \Delta q_{D,k,j}} \left( \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \right)^2$$

[0116] 上述目标函数的约束条件如下:

[0117] 当前状态下风电场母线电压的约束条件为:

$$[0118] \quad \underline{V}_k \leq V_k + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} s_{G,k,m} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} s_{D,k,n} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{V}_k$$

[0119] 其中,  $s_{G,k,m}$  和  $s_{D,k,n}$  分别表示第  $k$  个风电场中第  $m$  个风电机组和第  $n$  个动态无功设备的无功功率对该风电场母线电压的灵敏度系数,  $V_k$  表示当前状态下第  $k$  个风电场母线电压值,  $\underline{V}_k$  和  $\overline{V}_k$  分别表示第  $k$  个风电场母线电压值的下限值与上限值;

[0120] 当前状态下风电机组机端电压的约束条件为:

$$[0121] \quad \underline{v_{G,k,i}} \leq v_{G,k,i} + \sum_{m=1}^{N_{G,k}} c_{G,k,m,i} \Delta q_{G,k,i} + \sum_{n=1}^{N_{D,k}} c_{D,k,n,i} \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{v_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0122] 其中,  $c_{G,k,m,i}$  和  $c_{D,k,n,i}$  分别表示第  $k$  个风电场中第  $m$  个风电机组和第  $n$  个动态无功设备的无功功率对第  $i$  个风电机组的电压的灵敏度系数,  $v_{G,k,i}$  表示第  $k$  个风电场中第  $i$  个风电

机组的机端电压值,  $v_{G,k,i}$  和  $\overline{v_{G,k,i}}$  分别表示第k个风电场中第i个风电机组的机端电压下限值与上限值;

[0123] 第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力约束条件为:

$$[0124] \quad \underline{\Delta q_{G,k,i}} \leq \Delta q_{G,k,i} \leq \overline{\Delta q_{G,k,i}}, \quad i=1,2,\dots,N_{G,k}$$

[0125] 其中,  $\underline{\Delta q_{G,k,i}}$  和  $\overline{\Delta q_{G,k,i}}$  分别表示第k个风电场中第i个风电机组无功功率出力调节量的下限值与上限值;

[0126] 第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力约束条件为:

$$[0127] \quad \underline{\Delta q_{D,k,j}} \leq \Delta q_{D,k,j} \leq \overline{\Delta q_{D,k,j}}, \quad j=1,2,\dots,N_{D,k}$$

[0128] 其中,  $\underline{\Delta q_{D,k,j}}$  和  $\overline{\Delta q_{D,k,j}}$  分别表示第k个风电场中第j个动态无功设备无功功率出力调节量的下限值与上限值;

[0129] 第k个风电场所有风电机组的无功功率值总和约束条件为:

$$[0130] \quad \sum_{i=1}^{N_{G,k}} \Delta q_{G,k,i} = \Delta Q_{G,k}^*$$

[0131] 第k个风电场所有动态无功设备的无功功率值总和约束条件为:

$$[0132] \quad \sum_{j=1}^{N_{D,k}} \Delta q_{D,k,j} = \Delta Q_{D,k}^*$$

[0133] 根据上述步骤(4-1)的计算结果和上述约束条件,求解上述目标函数,分别得到风电场中各动态无功设备的最优无功功率调节量的  $\Delta q_{D,k,j}^*$ ,实现电网中风电系统的动态无功设备无功功率的优化。