(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108521125 A
(43)申请公布日 2018.09.11

(21)申请号 201810393052.8

(22)申请日 2018.04.27

(71)申请人 长沙理工大学
地址 410114 湖南省长沙市雨花区万家丽南路二段960号

(72)发明人 马瑞 秦佳倩 颜宏文

(51)Int.Cl.
H02J 3/00(2006.01)

权利要求书1页 说明书3页 附图1页

(54)发明名称

一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法

(57)摘要

本发明公开一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法，涉及多能流系统安全稳定运行领域，包括以下步骤：建立电-气耦合系统概率连续潮流模型；应用预测-校正的方法来逐渐逼近系统临界运行点来计算电气耦合系统中电力网络及天然气网络的最大负荷裕度。该研究结论可以应用于含风电电力系统的电-气耦合系统当中，通过对电力网络及天然气网络的最大负荷裕度分析计算，可解决风电场接入系统在电-气耦合系统静态安全稳定性方面的问题，能为相关运行决策人员提供必要的参考信息。本发明适应于能源互联发展趋势，可以保证多能流系统的安全、高效和环保运行。

CN 108521125 A

1.一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法，其特征在于：

(1)提出电-气耦合系统概率连续潮流模型；

(2)应用预测-校正的方法来逐渐逼近系统临界运行点，来计算电-气耦合系统中电力网络及天然气网络的最大负荷裕度。

2.根据权利要求1所述的一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法，其特征在于，所述步骤1)中提出电-气耦合系统概率连续潮流模型，通过能源集线器(energy hub，EH)把电力网络与天然气网络耦合起来，建立含风电电-气耦合系统含参数潮流方程。

3.根据权利要求1所述的一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法，其特征在于，所述步骤2)中应用预测-校正的方法来逐渐逼近系统临界运行点，来计算电-气耦合系统中电力网络及天然气网络的最大负荷裕度。首先，设λ_e，λ_g分别为电力网络和天然气网络的负荷参数，在预测计算中，首先确定变量的预测方向，求解潮流方程；在校正计算中，通过牛顿-拉夫逊计算得到校正值作为下一次预测部分计算的初值，一直迭代至系统临界运行点。

一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法，属于多能流系统安全稳定运行领域。

背景技术

[0002] 在能源互联的背景下，电力系统、天然气系统彼此之间的耦合不断加强，电力、天然气等能源需求量日益增大。风电作为可再生清洁能源，被广泛地应用于地区发电，但由于风机的有功出力受风速的影响而具有随机性和不确定性等特征，为了保证多能流系统的安全高效稳定运行，在含风电电力系统的电-气耦合系统的静态安全稳定分析的问题中，对风电不确定性的分析以及电-气耦合系统概率连续潮流建模亟待研究。基于此，提出一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法对多能流系统的安全稳定运行具有现实意义。

[0003] 文献《计及电-气互联能源系统安全约束的可用输电能力计算》考虑了电气耦合系统安全约束，提出一种基于线性预测的连续潮流法进行求解，用线性预测法辨识制约电力系统可输电能力的关键约束，对电力系统可输电能力进行了计算；文献《一种基于连续潮流的在线静态稳定综合评估方法》通过对电压可控节点的优化，来达到提高系统负荷裕度的要求；文献《New parameterization schemes for the continuation load flow method》考虑了电力系统保护和自动装置动作对于负荷裕度计算的影响，进而应用了一种在线计算的连续潮流算法，来计算系统的稳定裕度。目前，电力系统的静态安全分析方面已有广泛研究，但随着电-气系统的高度耦合，考虑电-气耦合系统的静态安全稳定分析的鲜有研究，所以，需要研究一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法。

[0004] 为了保证多能流系统安全稳定运行，研究电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法十分必要，在能源互联网背景下有着重要意义。

发明内容

[0005] 针对现有技术的不足，本发明“一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法”，建立电-气耦合系统概率连续潮流模型，应用预测-校正的方法来逐渐逼近系统临界运行点来计算电-气耦合系统中电力网络及天然气网络的最大负荷裕度。

[0006] 本发明采用如下技术方案：一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法，该方法包括如下步骤：

[0007] 步骤1：建立电-气耦合系统概率连续潮流模型；

[0008] 步骤2：应用预测-校正的方法来逐渐逼近系统临界运行点来计算电-气耦合系统中电力网络及天然气网络的最大负荷裕度。

附图说明

[0009] 图1是本发明的算法流程图。

具体实施方式

[0010] 本发明包括以下步骤：

[0011] 步骤1：建立电-气耦合系统概率连续潮流模型；

[0012] 本发明研究风电场出力的不确定性，采用二参数的威布尔分布模型来描述风速v的随机变化规律，风力发电机的输出功率P_W。关于风电机组的建模已被广泛研究，本发明将直接应用，细节不再赘述。

[0013] 下式表示的是下式表示的是含风电电-气耦合系统含参数潮流方程组：

[0014]
$$\begin{cases} f_p = (1+\lambda_e)(P_{Gi} - P_{Li}) - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) = 0 \\ f_Q = -(1+\lambda_e)(Q_{Gi} - Q_{Li}) - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) = 0 \\ f_f = (A+U) f_g (1+\lambda_g) + \omega - T\tau = 0 \\ f_{Le} = L_e - \eta_{Trans}(P_e + P_W) - v\eta_{CHP.e} P_g = 0 \\ f_{Lh} = L_h - \eta_{CHP.Th} P_g - (1-v)\eta_{Fur} P_g = 0 \end{cases}$$

[0015] 式中，P_{Gi}、P_{Li}、Q_{Gi}、Q_{Li}分别代表初始点发电机发出的有功功率、有功负荷、无功功率以及无功负荷；V_i、θ_i分别表示节点电压和节点相角；A为去掉压缩机管道的支路节点关联矩阵；U为压缩机节点关联矩阵；ω为天然气气体输入量；Tτ为压缩机气体需求量；η_{Trans}、$\eta_{CHP.e}$、$\eta_{CHP.Th}$、η_{Fur}、η_{Ex}，分别为能源集线器(energy hub，EH)中的变压器、CHP发电部分、CHP供热部分、热锅炉和热交换机的转化效率；P_e、P_g分别为EH输入的电功率和天然气。

[0016] 电-气耦合系统概率连续潮流模型简记为：

[0017]
$$f(V,\theta,f_g,p,P_e,P_g,\lambda_e,\lambda_g) = \begin{bmatrix} f_e(V,\theta,\lambda_e) \\ f_g(f_g,p,\lambda_g) \\ f_{EH}(P_e,P_g) \end{bmatrix}$$

[0018] 步骤2：应用预测-校正的方法来逐渐逼近系统临界运行点来计算电气耦合系统中电力网络及天然气网络的最大负荷裕度。

[0019] 本发明在连续潮流方程中计及负荷参数λ_e，λ_g。使得$\lambda_e \in [0,\lambda_{ec}]$，$\lambda_g \in [0,\lambda_{gc}]$，其中$\lambda_{ec}$和$\lambda_{gc}$分别为电力网络和天然气网络在临界点时的负荷增长系数。在λ＝0时对应于原始运行点的负荷水平，在$\lambda=\lambda_c$时对应于在给定负荷增长方式下静态稳定临界点的负荷水平。

[0020] (1)预测计算

[0021] 1)对含参数潮流方程组求微分得到：

[0022]
$$\frac{\partial f}{\partial V}dV + \frac{\partial f}{\partial \theta}d\theta + \frac{\partial f}{\partial f_g}df_g + \frac{\partial f}{\partial p}dp + \frac{\partial f}{\partial P_e}dP_e + \frac{\partial f}{\partial P_g}dP_g + \frac{\partial f}{\partial \lambda_e}d\lambda_e + \frac{\partial f}{\partial \lambda_g}d\lambda_g = 0$$

[0023] 由于潮流方程中引入了参数λ_e，λ_g，增加了两个未知状态变量，而需增设的两个一维向量对上式构成的雅可比矩阵加入两个对应的行向量e_{1k}^T，e_{2k}^T；为了求解这个潮流方程需要增加一个维度的方程$dx_k=\pm 1$，从而来确定预测方向切向量的解。

[0024] 式中x表示电-气耦合系统的状态变量V，θ，f_g，p，P_e，P_g，λ_e，λ_g，连续潮流预测步的计

算公式为：

[0025] $$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \lambda_e} & \frac{\partial f}{\partial \lambda_g} \\ & e_{1k}^T & \\ & e_{2k}^T & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda_e \\ d\lambda_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix}$$

[0026] 切向量求出后，下一步的预测值由下式给出。

[0027] $$\begin{bmatrix} x\% \\ \lambda_e\% \\ \lambda_g\% \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ \lambda_{e0} \\ \lambda_{g0} \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda_e \\ d\lambda_g \end{bmatrix}$$

[0028] 式中$x\%$、$\lambda_e\%$、$\lambda_g\%$为预估值，x_0、λ_{e0}、λ_{g0}为初始值，σ为预测步长。

[0029] (2)校正计算

[0030] 在校正步计算中，采用垂直校正的方法，以$[x\%, \lambda_e\%, \lambda_g\%]^T$为初值，应用牛顿-拉夫逊法求解下述校正方程。

[0031] $$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \lambda_e} & \frac{\partial f}{\partial \lambda_g} \\ & e_{1k}^T & \\ & e_{2k}^T & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda_e \\ \Delta \lambda_g \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} f(x, \lambda_e, \lambda_g) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0032] 式中Δx、$\Delta \lambda_e$、$\Delta \lambda_g$为修正量，在校正计算中，通过牛顿-拉夫逊计算得到校正值作为下一次预测部分计算的初值，一直迭代至系统临界运行点，由此来计算电-气耦合系统中电力网络及天然气网络的最大负荷裕度。

[0033] 据此就得到一种电-气耦合系统概率连续潮流建模及其求解方法。

[0034] 以上实施方案仅用于说明本发明，而并非对本发明的限制，有关技术领域的普通技术人员，在不脱离本发明的精神和范围的情况下，还可以做出各种变化和变型，因此所有等同的技术方案也属于本发明的保护范畴。

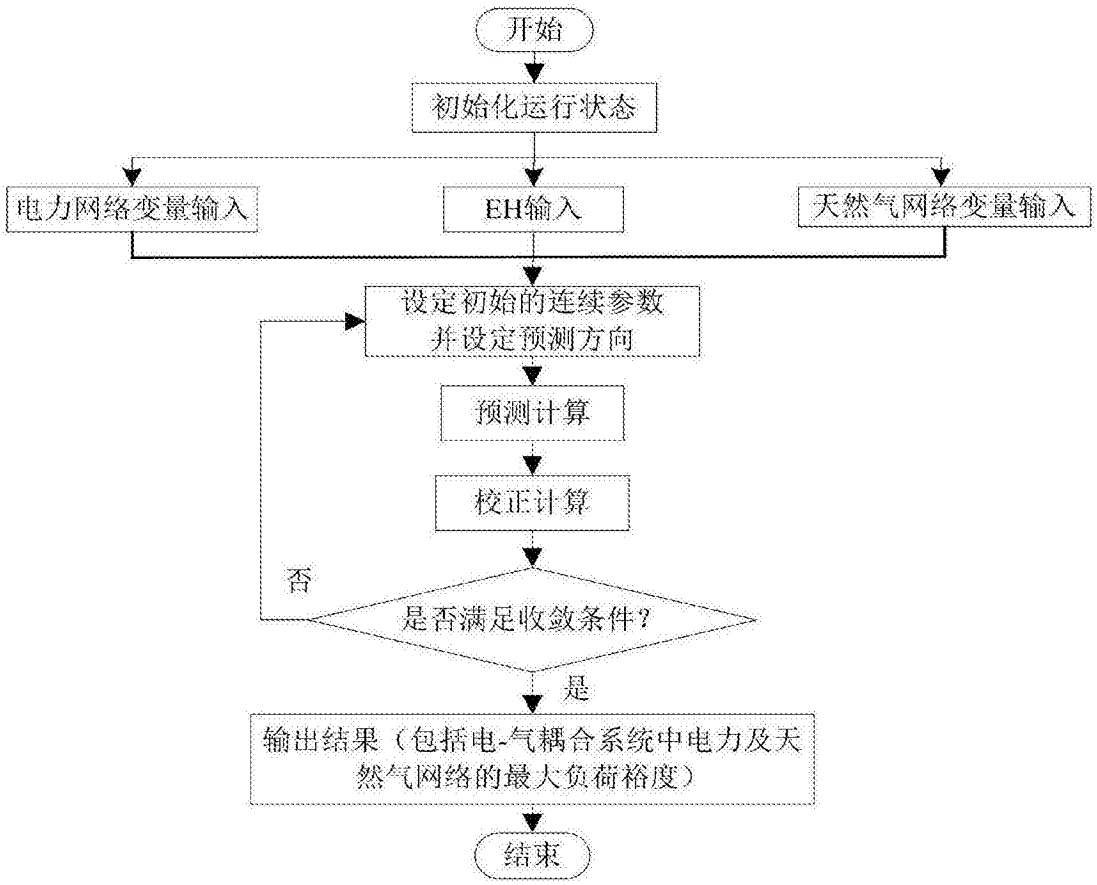
开始
初始化运行状态
电力网络变量输入
EH输入
天然气网络变量输入
设定初始的连续参数
并设定预测方向
预测计算
校正计算
否
是否满足收敛条件？
是
输出结果（包括电-气耦合系统中电力及天
然气网络的最大负荷裕度）
结束

图1