



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107069710 B

(45)授权公告日 2019.12.24

(21)申请号 201710179062.7

罗忠游 王四海 祁伟

(22)申请日 2017.03.23

(74)专利代理机构 乌鲁木齐合纵专利商标事务所 65105

(65)同一申请的已公布的文献号

代理人 周星莹 汤建武

申请公布号 CN 107069710 A

(43)申请公布日 2017.08.18

(51)Int.Cl.

H02J 3/00(2006.01)

(73)专利权人 新疆电力建设调试所

地址 830011 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市新市区贵州路13号

(56)对比文件

CN 103326358 A,2013.09.25,

CN 103972884 A,2014.08.06,

专利权人 国网新疆电力公司电力科学研究院

国家电网公司

Mohammad Hassanzadeh等.《A short-time nodal voltage phasor forecasting method using temporal and spatial correlation》.《TRANSACTIONS ON POWER SYSTEM》.2016,第31卷(第5期),

(72)发明人 李德存 秦艳辉 孙谊嫒 沈中信

刘威麟 依力扎提吐尔汗 高山

闫亚岭 王伟 祁晓笑 王琛

焦春雷 刘大贵 孙冰 王方楠

审查员 王嫒嫒

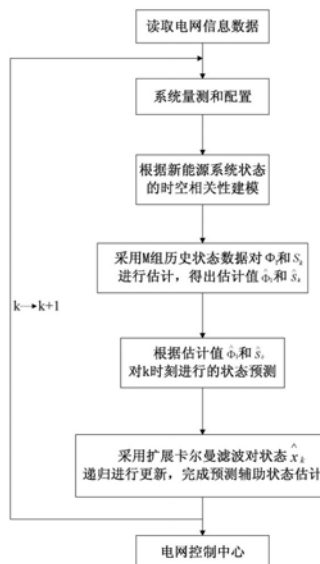
权利要求书3页 说明书8页 附图5页

(54)发明名称

计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法

(57)摘要

本发明涉及电力系统运行与控制技术技术领域,是一种计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法,包括以下步骤:第一步:读取电网信息数据;第二步:系统量测和配置;第三步:根据新能源系统状态的时空相关性建模;第四步:采用M组历史状态数据对 $\Phi_1$ 和 $S_k$ 进行估计;第五步:根据估计值 $\hat{\Phi}_1$ 和 $\hat{S}_k$ 进行k时刻的状态预测;第六步:进行预测辅助状态估计第七步:将k时刻的状态估计结果发送给电网控制中心;本发明克服了静态状态估计不能满足新能源并网随机性和波动性,对新能源并网进行实时、有效、准确的状态估计,提高了短期状态预测的精度,提高了最终状态估计的精度,充分反映电网的动态特征,为电力系统控制中心的相关的高级应用提供数据支持。



CN 107069710 B

1. 一种计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法,其特征在于:包括以下步骤:

第一步:读取电网信息数据,根据读取的电网信息数据得出节点导纳矩阵和支路-节点关联矩阵,所述电网信息数据包括历史状态估计数据、电力系统当前的网络参数、拓扑结构和线路阻抗,之后进入第二步;

第二步:电网系统量测和配置,根据节点导纳矩阵和支路-节点关联矩阵建立电压幅值量测、功率注入量测和潮流量测的量测函数,根据量测函数计算量测 $z_k$ ,根据量测 $z_k$ 对系统状态进行配置,所述电网系统的量测 $z_k$ 包括节点电压幅值量测、功率注入量测和潮流量测,之后进入第三步;

第三步:根据电网系统中新能源的时空相关性建模,具体如下:

(一)建立如下式所示的向量自递归模型,

$$x_k = \Phi_1 x_{k-1} + \dots + \Phi_p x_{k-p} + \varepsilon_k \quad (1)$$

其中, $k$ 表示量测采样时刻; $\{x_{k-1}, \dots, x_{k-p}\}$ 表示系统历史状态; $x_k$ 是当前时刻的状态预测值; $\{\Phi_1, \dots, \Phi_p\}$ 是模型参数矩阵; $p$ 是模型阶数; $\varepsilon_k$ 是模型误差, $S_k$ 是协方差矩阵,即高斯随机变量; $\{\Phi_1, \dots, \Phi_p\}$ 和 $S_k$ 的对角元素表示节点电压和相角的时间相关性,而其非对角元素表征空间相关性;

(二)保留一阶向量,简化向量自递归模型,完成模型的建立,简化后的模型如下式所示:

$$x_k = \Phi_1 x_{k-1} + \varepsilon_k \quad (2)$$

之后进入第四步;

第四步:采用 $M$ 组历史状态数据对 $\Phi_1$ 和 $S_k$ 进行估计,估计值 $\hat{\Phi}_1$ 和 $\hat{S}_k$ 如下式所示:

$$\hat{\Phi}_1 = \Pi(1)\Pi(0)^{-1} \quad (3)$$

$$\hat{S}_k = \Pi(0) - \Pi(1) \quad (4)$$

其中, $\Pi(0)$ 和 $\Pi(1)$ 为采样协方差矩阵,

$$\Pi(0) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T, \quad \Pi(1) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (x_{i+1} - \mu)(x_{i+1} - \mu)^T; \mu \text{ 是历史}$$

数据的采样均值,  $\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i$ ;之后进入第五步;

第五步:根据估计值 $\hat{\Phi}_1$ 和 $\hat{S}_k$ 进行 $k$ 时刻的状态预测, $k$ 时刻的状态预测值 $x_{k|k-1}$ 及其预测误差协方差矩阵 $\Sigma_{k|k-1}$ 如下式所示:

$$x_{k|k-1} = \hat{\Phi}_1 \hat{x}_{k-1} \quad (5)$$

$$\Sigma_{k|k-1} = \hat{\Phi}_1 \Sigma_{k-1} \hat{\Phi}_1^T + \hat{S}_k \quad (6)$$

之后进入第六步;

第六步:进行预测辅助状态估计,具体如下:

(一)根据第二步测得的 $k$ 时刻的量测 $z_k$ 得出系统在第 $k$ 次采样时的状态 $x_k$ , $x_k$ 的关系式

如下式所示：

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (7)$$

其中， $h(\cdot)$  表示  $m$  维非线性量测函数向量； $v_k$  是服从正态分布的随机白噪声，即  $v_k \sim N(0, R_k)$ ， $R_k$  是量测误差协方差矩阵；

(二) 采用扩展卡尔曼滤波对状态  $\hat{x}_k$  递归进行更新，完成系统进行预测辅助状态估计，具体如下：

(1) 建立如下式所示的目标函数：

$$\min_{x_k} (x_k - x_{k|k-1})^T \Sigma_{k|k-1}^{-1} (x_k - x_{k|k-1}) + [z_k - h(x_k)]^T R_k^{-1} [z_k - h(x_k)] \quad (8)$$

(2) 对目标函数进行优化，得出状态  $\hat{x}_k$  递归的更新结果，状态  $\hat{x}_k$  递归的更新结果如下式所示：

$$\hat{x}_k = x_{k|k-1} + K_k [z_k - h(x_{k|k-1})] \quad (9)$$

其中， $K_k$  为增益矩阵， $K_k = \Sigma_{k|k-1} H_k^T \mathfrak{R}_k^{-1}$ ； $\mathfrak{R}_k = H_k \Sigma_{k|k-1} H_k^T + R_k$ ； $H_k$  为雅克比矩阵，

$H_k = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x_{k|k-1}}$ ； $\Sigma_k$  为误差协方差矩阵， $\Sigma_k = (I - K_k H_k) \Sigma_{k|k-1}$ ； $I$  为单位矩阵；之后

进入第七步；

第七步：将  $k$  时刻的状态估计结果发送给电网控制中心，并进入第二步进行  $k+1$  时刻的状态估计。

2. 根据权利要求 1 所述的一种计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法，其特征在于：第二步中将电网系统中的每条输电线路等效为典型  $\pi$  等效电路进行系统的量测，量测函数如下：

(一) 典型  $\pi$  等效电路不含非变压器支路时节点的有功和无功注入量测函数、有功和无功潮流注入量测函数、电流幅值量测函数如下：

节点  $i$  的有功注入量测函数为：

$$P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

节点  $i$  的无功注入量测函数为：

$$Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

节点  $i$  到  $j$  的注入有功量测函数为：

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (12)$$

节点  $i$  到  $j$  的注入无功潮流量测函数为：

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{si} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (13)$$

节点  $i$  到  $j$  的线路电流幅值量测函数为：

$$I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_i} \quad (14)$$

(二) 典型 $\pi$ 等效电路含变压器支路时节点的有功和无功注入量测函数、有功和无功潮流注入量测函数、电流幅值量测函数如下:

节点i的有功注入量测函数为:

$$P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

节点i的无功注入量测函数为:

$$Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

节点i到j的注入有功量测函数为:

$$P_{ij} = -\frac{1}{K} V_i V_j b_T \sin \theta_{ij} \quad (15)$$

节点i到j的注入无功潮流量测函数为:

$$Q_{ij} = -\frac{1}{K^2} V_i^2 b_T + \frac{1}{K} V_i V_j b_T \cos \theta_{ij} \quad (16)$$

节点j到i的注入有功量测函数为:

$$P_{ji} = \frac{1}{K} V_i V_j b_T \sin \theta_{ij} \quad (17)$$

节点j到i的注入无功潮流量测函数为:

$$Q_{ji} = -\frac{1}{K^2} V_i^2 b_T + \frac{1}{K} V_i V_j b_T \cos \theta_{ij} \quad (16)$$

节点i到j的线路电流幅值量测函数为:

$$I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_i} \quad (14)$$

其中,  $V_i$ 和 $V_j$ 分别为节点i和j的电压幅值;节点i和j之间的相角差 $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ,  $\theta_i$ 和 $\theta_j$ 分别为节点i和j的相角;  $N_i$ 为连接到节点i的节点数量;

$G_{ij} + jB_{ij}$ 为导纳矩阵的第i行第j列元素;  $g_{ij} + jb_{ij}$ 为节点i到j间的序导纳;  $g_{si} + jb_{si}$ 为节点i到j间的并联导纳;  $K$ 为变压器非标准变比;  $b_T$ 为变压器标准侧的电纳。

## 计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种电力系统运行与控制技术领域,是一种计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法。

### 背景技术

[0002] 智能电网以各种新能源(风能、太阳能等可再生能源)的大规模并网发电为重要特征之一。以新疆电网为例,近年来,新疆电网进入跨越式大发展时期,装机容量每年保持20%以上的增长率,预计到2017年全网装机容量将突破10000万千瓦,其中新能源装机容量达30%,排名西北电网第一。新能源发电具有随机性、波动性和间歇性等特点,将给电网的运行带来极大的不确定性。同时,新能源并网改变了传统电网的发、输、配单向供电模式;电能的产、供、需不确定性和时空多尺度性愈发明显;电网的复杂性和规模不断增加;这些都对电网的安全稳定性与调度运行等提出了巨大挑战。

[0003] 传统电力系统状态估计主要是对数据采集与监控系统(SCADA)提供的实时信息进行滤波,以提高数据精度,排除错误信息的干扰,从而得到电力系统实时状态数据库,为能量管理中心进行各种重要的控制提供数据支持,例如,电网的实时建模、潮流优化、不良数据的检测与辨识。状态估计的主要方法包括加权最小二乘估计、抗差估计等静态方法和扩展卡尔曼滤波等动态估计方法。以上的研究成果依然存在诸多缺陷和不足,如现有状态估计算法对新能源并网的考虑不足,没有能够有效反应新能源波动性、间歇性和不确定性特点的状态估计模型;静态估计算法虽然较为成熟并且其估计依赖于采样速率较慢SACDA量测,而实际运行的电力系统是一个动态变化的系统,随着新能源的大规模并网,其波动性、间歇性以及负荷变化的不确定性愈是加剧了系统状态的变化频率,从而静态状态估计结果不能反映电网的动态特性,满足不了智能电网实时监控的运行需求。

### 发明内容

[0004] 本发明提供了一种计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法,克服了上述现有技术之不足,其能有效解决现有电力系统静态估算法不能对接入新能源的电网系统进行实时、有效、准确的状态估计,不能反映电网的动态特征的问题。

[0005] 本发明的技术方案是通过以下措施来实现的:一种计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法,包括以下步骤:

[0006] 第一步:读取电网信息数据,根据读取的电网信息数据得出节点导纳矩阵和支路-节点关联矩阵,所述电网信息数据包括历史状态估计数据、电力系统当前的网络参数、拓扑结构和线路阻抗,之后进入第二步;

[0007] 第二步:电网系统量测和配置,根据节点导纳矩阵和支路-节点关联矩阵建立电压幅值量测、功率注入量测和潮流量测的量测函数,根据量测函数计算量测 $z_k$ ,根据量测 $z_k$ 对系统状态进行配置,所述电网系统的量测 $z_k$ 包括节点电压幅值量测、功率注入量测和潮流量测,之后进入第三步;

[0008] 第三步:根据电网系统中新能源的时空相关性建模,具体如下:

[0009] (一)建立如下式所示的向量自递归模型,

$$[0010] \quad x_k = \Phi_1 x_{k-1} + \dots + \Phi_p x_{k-p} + \varepsilon_k \quad (1)$$

[0011] 其中, $k$ 表示量测采样时刻; $\{x_{k-1}, \dots, x_{k-p}\}$ 表示系统历史状态; $x_k$ 是当前时刻的状态预测值; $\{\Phi_1, \dots, \Phi_p\}$ 是模型参数矩阵; $p$ 是模型阶数; $\varepsilon_k$ 是模型误差, $S_k$ 是协方差矩阵,即高斯随机变量; $\{\Phi_1, \dots, \Phi_p\}$ 和 $S_k$ 的对角元素表示节点电压和相角的时间相关性,而其非对角元素表征空间相关性;

[0012] (二)保留一阶向量,简化向量自递归模型,完成模型的建立,简化后的模型如下式所示:

$$[0013] \quad x_k = \Phi_1 x_{k-1} + \varepsilon_k \quad (2)$$

[0014] 之后进入第四步;

[0015] 第四步:采用 $M$ 组历史状态数据对 $\Phi_1$ 和 $S_k$ 进行估计,估计值 $\hat{\Phi}_1$ 和 $\hat{S}_k$ 如下式所示:

$$[0016] \quad \hat{\Phi}_1 = \Pi(1)\Pi(0)^{-1} \quad (3)$$

$$[0017] \quad \hat{S}_k = \Pi(0) - \Pi(1) \quad (4)$$

[0018] 其中, $\Pi(0)$ 和 $\Pi(1)$ 为采样协方差矩阵, $\Pi(0) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T$ ,

$\Pi(1) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (x_{i+1} - \mu)(x_{i+1} - \mu)^T$ ;  $\mu$ 是历史数据的采样均值, $\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i$ ;之后进入第五步;

[0019] 第五步:根据估计值 $\hat{\Phi}_1$ 和 $\hat{S}_k$ 进行 $k$ 时刻的状态预测, $k$ 时刻的状态预测值 $x_{k|k-1}$ 及其预测误差协方差矩阵 $\Sigma_{k|k-1}$ 如下式所示: $x_{k|k-1} = \hat{\Phi}_1 \hat{x}_{k-1}$  (5)

$$[0020] \quad \Sigma_{k|k-1} = \hat{\Phi}_1 \Sigma_{k-1} \hat{\Phi}_1^T + \hat{S}_k \quad (6)$$

[0021] 之后进入第六步;

[0022] 第六步:进行预测辅助状态估计,具体如下:

[0023] (一)根据第二步测得的 $k$ 时刻的量测 $z_k$ 得出系统在第 $k$ 次采样时的状态 $x_k$ , $x_k$ 的关系式如下式所示:

$$[0024] \quad z_k = h(x_k) + v_k \quad (7)$$

[0025] 其中, $h(\cdot)$ 表示 $m$ 维非线性量测函数向量; $v_k$ 是服从正态分布的随机白噪声,即 $v_k \sim N(0, R_k)$ , $R_k$ 是量测误差协方差矩阵;

[0026] (二)采用扩展卡尔曼滤波对状态 $\hat{x}_k$ 递归进行更新,完成系统进行预测辅助状态估计,具体如下:

[0027] (1)建立如下式所示的目标函数:

$$[0028] \quad \min_{x_k} \left( x_k - x_{k|k-1} \right)^T \Sigma_{k|k-1}^{-1} \left( x_k - x_{k|k-1} \right) + \left[ z_k - h(x_k) \right]^T R_k^{-1} \left[ z_k - h(x_k) \right] \quad (8)$$

[0029] (2) 对目标函数进行优化, 得出状态  $\hat{x}_k$  递归的更新结果, 状态  $\hat{x}_k$  递归的更新结果如下式所示:

$$[0030] \quad \hat{x}_k = x_{k|k-1} + K_k \left[ z_k - h(x_{k|k-1}) \right] \quad (9)$$

[0031] 其中,  $K_k$  为增益矩阵,  $K_k = \Sigma_{k|k-1} H_k^T \mathfrak{R}_k^{-1}$ ;  $\mathfrak{R}_k = H_k \Sigma_{k|k-1} H_k^T + R_k$ ;  $H_k$  为雅克比矩阵,

$$H_k = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x_{k|k-1}}; \Sigma_k \text{ 为误差协方差矩阵, } \Sigma_k = (I - K_k H_k) \Sigma_{k|k-1}; I \text{ 为单位矩阵; 之后}$$

进入第七步;

[0032] 第七步: 将  $k$  时刻的状态估计结果发送给电网控制中心, 并进入第二步进行  $k+1$  时刻的状态估计。

[0033] 下面是对上述发明技术方案的进一步优化或/和改进:

[0034] 上述第二步中将电网系统中的每条输电线路等效为典型  $\pi$  等效电路进行系统的量测, 量测函数如下:

[0035] (一) 典型  $\pi$  等效电路不含非变压器支路时节点的有功和无功注入量测函数、有功和无功潮流注入量测函数、电流幅值量测函数如下:

[0036] 节点  $i$  的有功注入量测函数为:

$$[0037] \quad P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

[0038] 节点  $i$  的无功注入量测函数为:

$$[0039] \quad Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

[0040] 节点  $i$  到  $j$  的注入有功量测函数为:

$$[0041] \quad P_{ij} = V_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (12)$$

[0042] 节点  $i$  到  $j$  的注入无功潮流量测函数为:

$$[0043] \quad Q_{ij} = -V_i^2 (b_{si} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (13)$$

[0044] 节点  $i$  到  $j$  的线路电流幅值量测函数为:

$$[0045] \quad I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_i} \quad (14)$$

[0046] (二) 典型  $\pi$  等效电路含变压器支路时节点的有功和无功注入量测函数、有功和无功潮流注入量测函数、电流幅值量测函数如下:

[0047] 节点  $i$  的有功注入量测函数为:

$$[0048] \quad P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

[0049] 节点  $i$  的无功注入量测函数为:

$$[0050] \quad Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

[0051] 节点i到j的注入有功量测函数为:

$$[0052] \quad P_{ij} = -\frac{1}{K} V_i V_j b_T \sin \theta_{ij} \quad (15)$$

[0053] 节点i到j的注入无功潮流量测函数为:

$$[0054] \quad Q_{ij} = -\frac{1}{K^2} V_i^2 b_T + \frac{1}{K} V_i V_j b_T \cos \theta_{ij} \quad (16)$$

[0055] 节点j到i的注入有功量测函数为:

$$[0056] \quad P_{ji} = \frac{1}{K} V_i V_j b_T \sin \theta_{ij} \quad (17)$$

[0057] 节点j到i的注入无功潮流量测函数为:

$$[0058] \quad Q_{ji} = -\frac{1}{K^2} V_i^2 b_T + \frac{1}{K} V_i V_j b_T \cos \theta_{ij} \quad (16)$$

[0059] 节点i到j的线路电流幅值量测函数为:

$$[0060] \quad I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_i} \quad (14)$$

[0061] 其中,  $V_i$  和  $V_j$  分别为节点i和j的电压幅值; 节点i和j之间的相角差  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ,  $\theta_i$  和  $\theta_j$  分别为节点i和j的相角;  $N_i$  为连接到节点i的节点数量;  $G_{ij} + jB_{ij}$  为导纳矩阵的第i行第j列元素;  $g_{ij} + jb_{ij}$  为节点i到j间的序导纳;  $g_{si} + jb_{si}$  为节点i到j间的并联导纳;  $K$  为变压器非标准变比;  $b_T$  为变压器标准侧的电纳。

[0062] 本发明能充分计及新能源的随机性、间歇性、波动性等特点, 通过采用向量自递归模型能够有效的对系统节点的时间和空间相关性进行建模, 实时快速地追踪预测电网各节点运行状态, 从而克服了静态状态估计不能满足新能源并网随机性和波动性, 对新能源并网进行实时、有效、准确的状态估计, 提高了短期状态预测的精度, 提高了最终状态估计的精度, 充分反映电网的动态特征, 为电力系统控制中心进行经济调度、安全评估和其它相关的高级应用提供数据支持, 满足电网发展要求。

## 附图说明

[0063] 附图1为本发明的流程图。

[0064] 附图2为本发明的不含变压器支路的 $\pi$ 型等效电路量测计算图。

[0065] 附图3为本发明的变压器支路的 $\pi$ 型等效电路量测计算图。

[0066] 附图4是本发明实施例2的IEEE30系统测试图。

[0067] 附图5是本发明实施例2中采用传统方法各个节点电压幅值估计结果。

[0068] 附图6是本发明实施例2中采用传统方法各个节点电压相角估计结果。

[0069] 附图7是本发明实施例2中采用本发明各个节点电压幅值估计结果。

[0070] 附图8是本发明实施例2中采用本发明各个节点电压相角估计结果。



## 具体实施方式

[0071] 本发明不受下述实施例的限制,可根据本发明的技术方案与实际情况来确定具体的实施方式。

[0072] 下面结合实施例及附图对本发明作进一步描述:

[0073] 实施例1:如附图1、2、3所示,该计及新能源时空相关性的电力系统状态估计方法,包括以下步骤:

[0074] 第一步:读取电网信息数据,根据读取的电网信息数据得出节点导纳矩阵和支路-节点关联矩阵,所述电网信息数据包括历史状态估计数据、电力系统当前的网络参数、拓扑结构和线路阻抗,之后进入第二步;

[0075] 第二步:电网系统量测和配置,根据节点导纳矩阵和支路-节点关联矩阵建立电压幅值量测、功率注入量测和潮流量测的量测函数,根据量测函数计算量测 $z_k$ ,根据量测 $z_k$ 对系统状态进行配置,所述电网系统的量测 $z_k$ 包括节点电压幅值量测、功率注入量测和潮流量测,之后进入第三步;

[0076] 第三步:根据电网系统中新能源的时空相关性建模,具体如下:

[0077] (一)建立如下式所示的向量自递归模型,

$$[0078] \quad x_k = \Phi_1 x_{k-1} + \dots + \Phi_p x_{k-p} + \varepsilon_k \quad (1)$$

[0079] 其中, $k$ 表示量测采样时刻; $\{x_{k-1}, \dots, x_{k-p}\}$ 表示系统历史状态; $x_k$ 是当前时刻的状态预测值; $\{\Phi_1, \dots, \Phi_p\}$ 是模型参数矩阵; $p$ 是模型阶数; $\varepsilon_k$ 是模型误差, $S_k$ 是协方差矩阵,即高斯随机变量; $\{\Phi_1, \dots, \Phi_p\}$ 和 $S_k$ 的对角元素表示节点电压和相角的时间相关性,而其非对角元素表征空间相关性;

[0080] (二)保留一阶向量,简化向量自递归模型,完成模型的建立,简化后的模型如下式所示:

$$[0081] \quad x_k = \Phi_1 x_{k-1} + \varepsilon_k \quad (2)$$

[0082] 之后进入第四步;

[0083] 第四步:采用 $M$ 组历史状态数据对 $\Phi_1$ 和 $S_k$ 进行估计,估计值 $\hat{\Phi}_1$ 和 $\hat{S}_k$ 如下式所示:

$$[0084] \quad \hat{\Phi}_1 = \Pi(1)\Pi(0)^{-1} \quad (3)$$

$$[0085] \quad \hat{S}_k = \Pi(0) - \Pi(1) \quad (4)$$

[0086] 其中, $\Pi(0)$ 和 $\Pi(1)$ 为采样协方差矩阵, $\Pi(0) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T$ ,

$\Pi(1) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M-1} (x_{i+1} - \mu)(x_{i+1} - \mu)^T$ ;  $\mu$ 是历史数据的采样均值, $\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i$ ;之后进入第

五步;

[0087] 第五步:根据估计值 $\hat{\Phi}_1$ 和 $\hat{S}_k$ 进行 $k$ 时刻的状态预测, $k$ 时刻的状态预测值 $x_{k|k-1}$ 及其预测误差协方差矩阵 $\Sigma_{k|k-1}$ 如下式所示:

$$[0088] \quad x_{k|k-1} = \hat{\Phi}_1 \hat{x}_{k-1} \quad (5)$$

$$[0089] \quad \Sigma_{k|k-1} = \widehat{\Phi}_1 \Sigma_{k-1} \widehat{\Phi}_1^T + \widehat{S}_k \quad (6)$$

[0090] 之后进入第六步；

[0091] 第六步：进行预测辅助状态估计，具体如下：

[0092] (一) 根据第二步测得的k时刻的量测 $z_k$ 得出系统在第k次采样时的状态 $x_k$ ， $x_k$ 的关系式如下式所示：

$$[0093] \quad z_k = h(x_k) + v_k \quad (7)$$

[0094] 其中， $h(\cdot)$ 表示m维非线性量测函数向量； $v_k$ 是服从正态分布的随机白噪声，即 $v_k \sim N(0, R_k)$ ， $R_k$ 是量测误差协方差矩阵；

[0095] (二) 采用扩展卡尔曼滤波对状态 $\hat{x}_k$ 递归进行更新，完成系统进行预测辅助状态估计，具体如下：

[0096] (1) 建立如下式所示的目标函数：

$$[0097] \quad \min_{x_k} \left( x_k - x_{k|k-1} \right)^T \Sigma_{k|k-1}^{-1} \left( x_k - x_{k|k-1} \right) + \left[ z_k - h(x_k) \right]^T R_k^{-1} \left[ z_k - h(x_k) \right] \quad (8)$$

[0098] (2) 对目标函数进行优化，得出状态 $\hat{x}_k$ 递归的更新结果，状态 $\hat{x}_k$ 递归的更新结果如下式所示：

$$[0099] \quad \hat{x}_k = x_{k|k-1} + K_k \left[ z_k - h(x_{k|k-1}) \right] \quad (9)$$

[0100] 其中， $K_k$ 为增益矩阵， $K_k = \Sigma_{k|k-1} H_k^T \mathfrak{R}_k^{-1}$ ； $\mathfrak{R}_k = H_k \Sigma_{k|k-1} H_k^T + R_k$ ； $H_k$ 为雅克比矩阵，

$$H_k = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x_{k|k-1}}；\Sigma_k \text{为误差协方差矩阵，}\Sigma_k = (I - K_k H_k) \Sigma_{k|k-1}；I \text{为单位矩阵；之后}$$

进入第七步；

[0101] 第七步：将k时刻的状态估计结果发送给电网控制中心，并进入第二步进行k+1时刻的状态估计。

[0102] 这里，由于新能源的间歇性和波动性增大了短时间内（分钟级或者秒级）负荷突变的概率，整个系统的运行不再是准稳态，电网功率注入模式的变化和新能源的间歇性这两大因素改变了系统各个节点电压和相角之间的时间和空间关联性，即新能源包括风力发电机、光伏等都呈现出比较明显的时间和空间相关性，并且驱动系统进行状态变化的负荷也表现出时间和空间相关性，从而系统的状态之间也会呈现出相应的时间和空间相关性。因此第三步中根据电网系统中新能源的的时空相关性即对电网各节点电压和相角之间的时间和空间关联性进行建模，第三步中，模型误差 $\varepsilon_k$ 通常情况下取均值0，且 $\{\Phi_1, \dots, \Phi_p\}$ 和 $S_k$ 的对角元素表示节点电压和相角的时间相关性，而其非对角元素表征空间相关性，第三步简化模型时由于在实际电力系统中，通常只对超短期的状态进行预测，因此将模型简化为一阶向量自递归模型；第六步中的 $R_k$ 为现有公知的量测误差协方差矩阵。

[0103] 本发明能充分计及新能源的随机性、间歇性、波动性等特点，通过采用向量自递归模型能够有效的对系统节点的时间和空间相关性进行建模，实时快速地追踪预测电网各节点运行状态（电压幅值和相角），从而克服了静态状态估计不能满足新能源并网随机性和波

动性的问题,对新能源并网进行实时、有效、准确的状态估计,提高了短期状态预测的精度,提高了最终状态估计的精度,充分反映了电网的动态特征,为电力系统控制中心进行经济调度、安全评估和其它相关的高级应用提供数据支持,满足电网发展要求。

[0104] 下面是对上述发明技术方案的进一步优化或/和改进:

[0105] 如附图2、3所示,第二步中将电网系统中的每条输电线路等效为典型 $\pi$ 等效电路进行系统的量测,量测函数如下:

[0106] (一)典型 $\pi$ 等效电路不含非变压器支路时节点的有功和无功注入量测函数、有功和无功潮流注入量测函数、电流幅值量测函数如下:

[0107] 节点i的有功注入量测函数为:

$$[0108] \quad P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

[0109] 节点i的无功注入量测函数为:

$$[0110] \quad Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

[0111] 节点i到j的注入有功量测函数为:

$$[0112] \quad P_{ij} = V_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (12)$$

[0113] 节点i到j的注入无功潮流量测函数为:

$$[0114] \quad Q_{ij} = -V_i^2 (b_{si} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (13)$$

[0115] 节点i到j的线路电流幅值量测函数为:

$$[0116] \quad I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_i} \quad (14)$$

[0117] (二)典型 $\pi$ 等效电路含变压器支路时节点的有功和无功注入量测函数、有功和无功潮流注入量测函数、电流幅值量测函数如下:

[0118] 节点i的有功注入量测函数为:

$$[0119] \quad P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

[0120] 节点i的无功注入量测函数为:

$$[0121] \quad Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

[0122] 节点i到j的注入有功量测函数为:

$$[0123] \quad P_{ij} = -\frac{1}{K} V_i V_j b_T \sin \theta_{ij} \quad (15)$$

[0124] 节点i到j的注入无功潮流量测函数为:

$$[0125] \quad Q_{ij} = -\frac{1}{K^2} V_i^2 b_T + \frac{1}{K} V_i V_j b_T \cos \theta_{ij} \quad (16)$$

[0126] 节点j到i的注入有功量测函数为:

$$[0127] \quad P_{ji} = \frac{1}{K} V_i V_j b_T \sin \theta_{ij} \quad (17)$$

[0128] 节点j到i的注入无功潮流量测函数为:

$$[0129] \quad Q_{ij} = -\frac{1}{K^2} V_i^2 b_T + \frac{1}{K} V_i V_j b_T \cos \theta_{ij} \quad (16)$$

[0130] 节点i到j的线路电流幅值量测函数为:

$$[0131] \quad I_{ij} = \frac{\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}}{V_i} \quad (14)$$

[0132] 其中,  $V_i$  和  $V_j$  分别为节点i和j的电压幅值; 节点i和j之间的相角差  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ,  $\theta_i$  和  $\theta_j$  分别为节点i和j的相角;  $N_i$  为连接到节点i的节点数量;  $G_{ij} + jB_{ij}$  为导纳矩阵的第i行第j列元素;  $g_{ij} + jb_{ij}$  为节点i到j间的序导纳;  $g_{si} + jb_{si}$  为节点i到j间的并联导纳;  $K$  为变压器非标准变比;  $b_T$  为变压器标准侧的电纳。

[0133] 实施例2:

[0134] 如附图4、5、6、7、8所示, 将发明在附图4中的IEEE 30节点系统上进行测试, 其中量测误差假设服从均值为0, 方差  $10^{-6}$  为的高斯分布, 经过测试仿真后最终的各个节点电压幅值和相角的测试结果如附图7和8所示; 再使用传统静态估计方法在在附图4中的IEEE 30节点系统上进行测试, 经过测试仿真后最终的各个节点电压幅值和相角的测试结果如附图5和6所示; 从附图5、6、7、8中可以看出, 本发明相比于传统状态估计方法, 估计精度更高, 更能实时地追踪系统的运行状态。

[0135] 以上技术特征构成了本发明的实施例, 其具有较强的适应性和实施效果, 可根据实际需要增减非必要的技术特征, 来满足不同情况的需求。

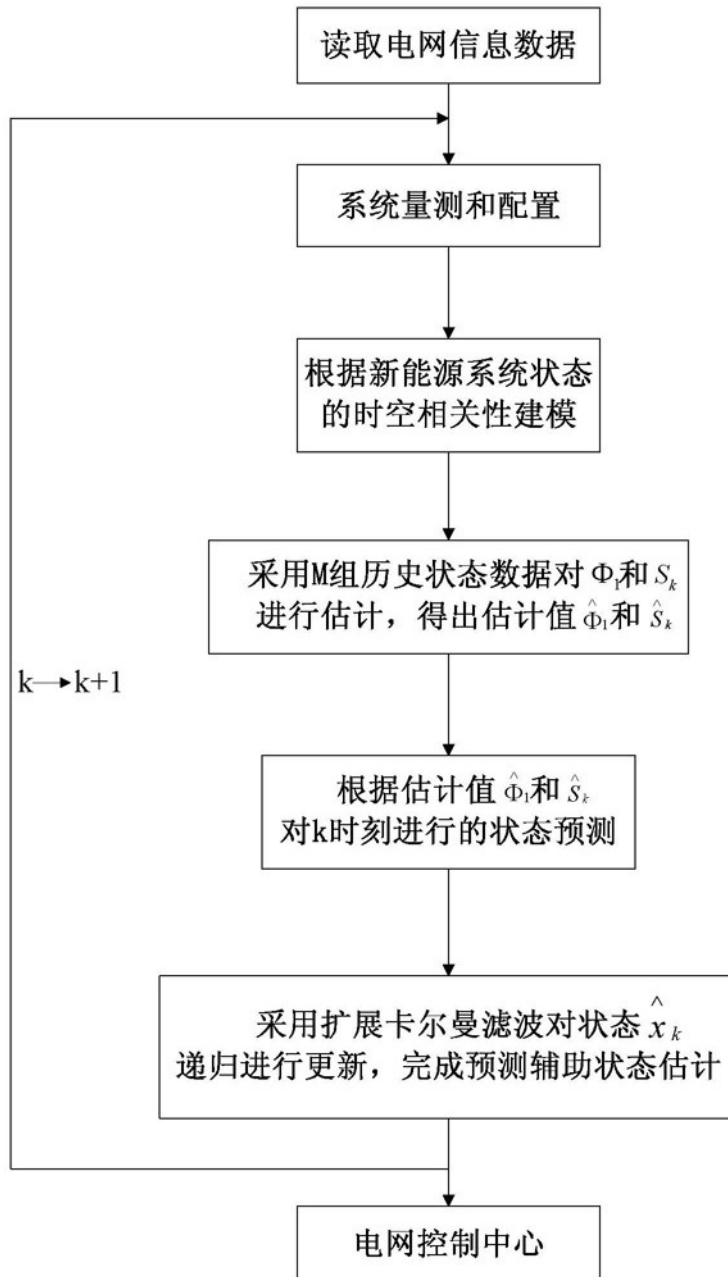


图1

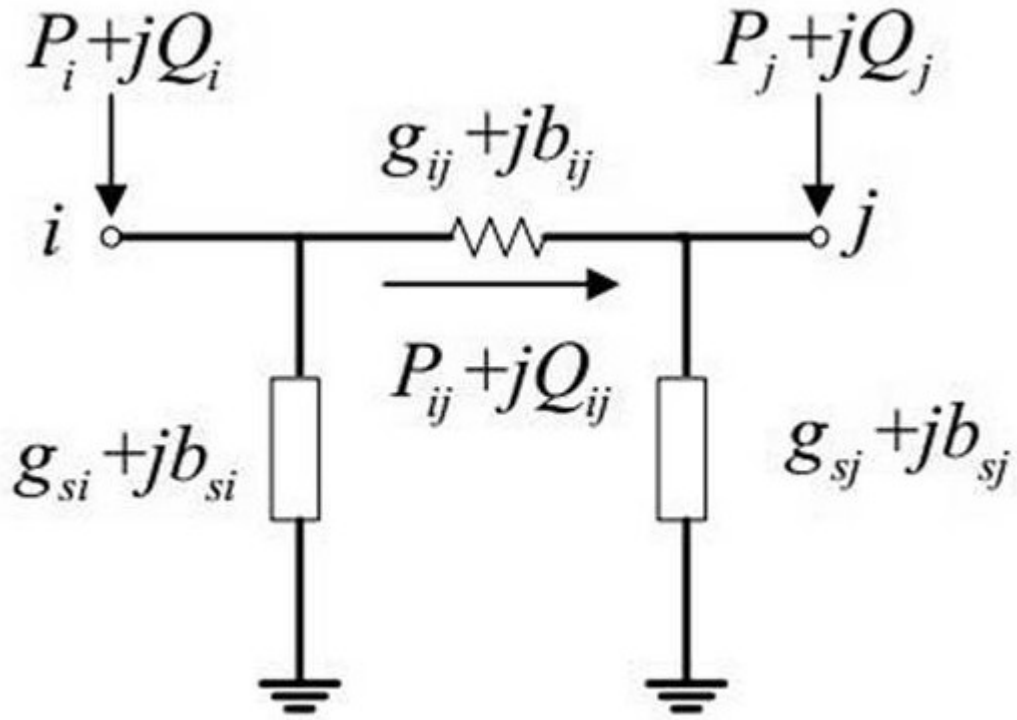


图2

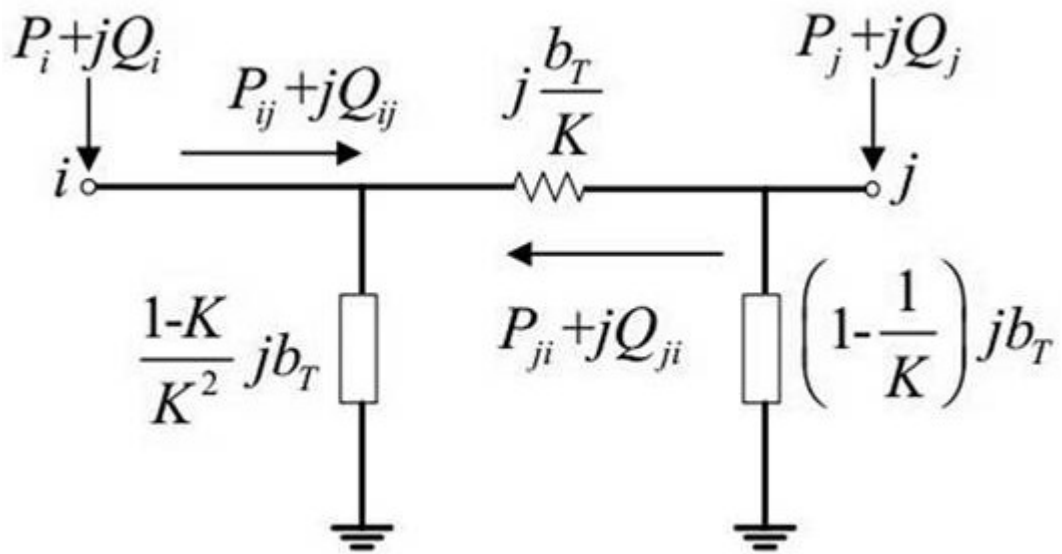


图3

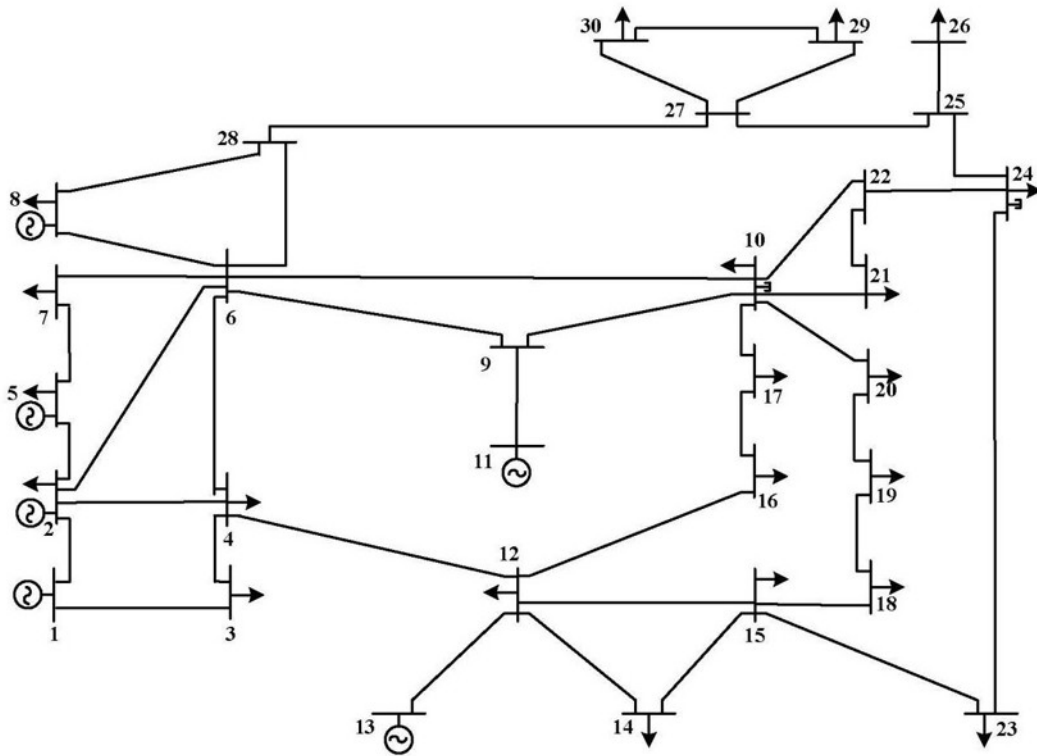


图4

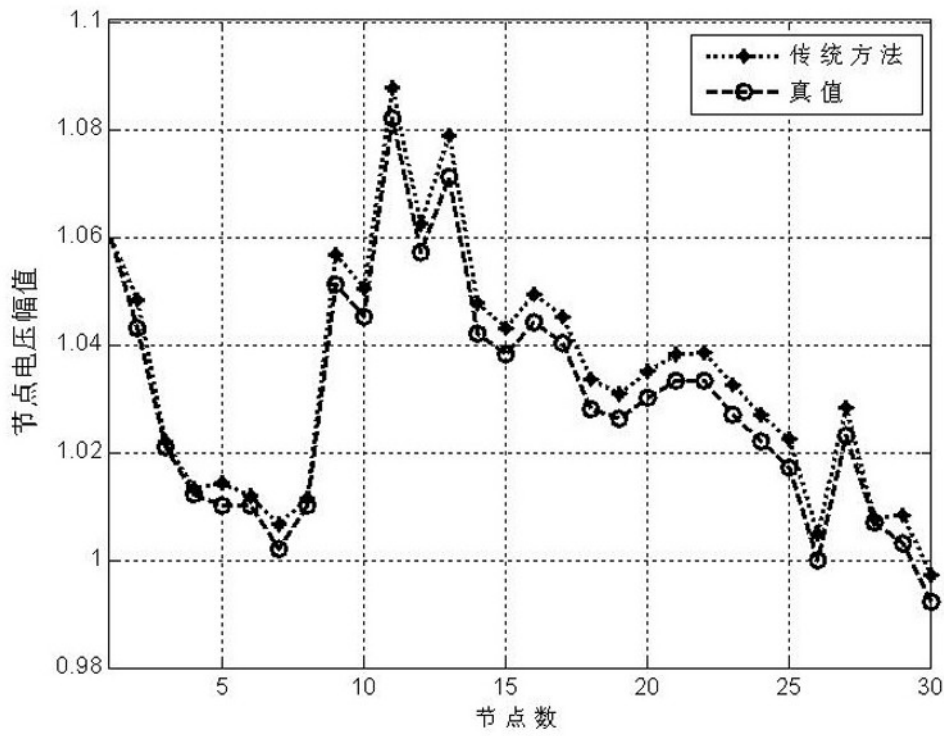


图5

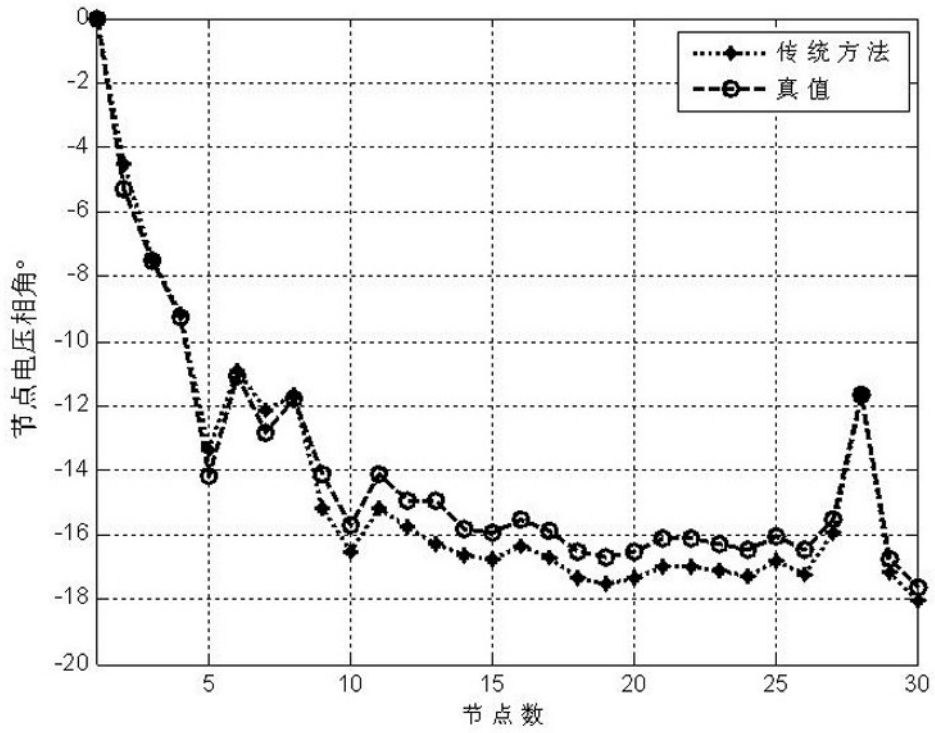


图6

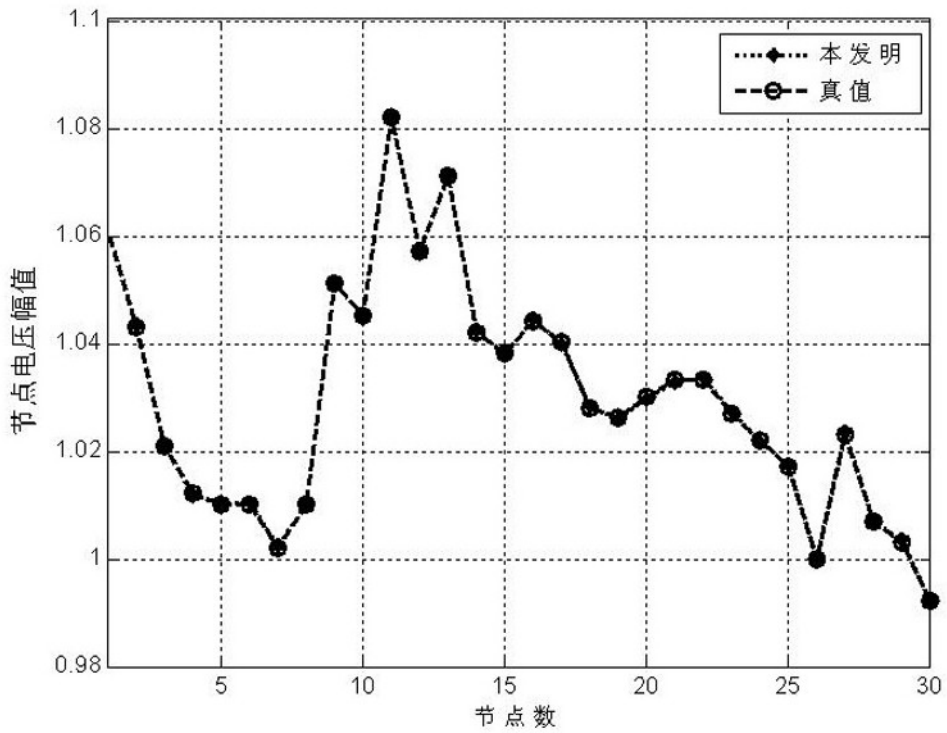


图7



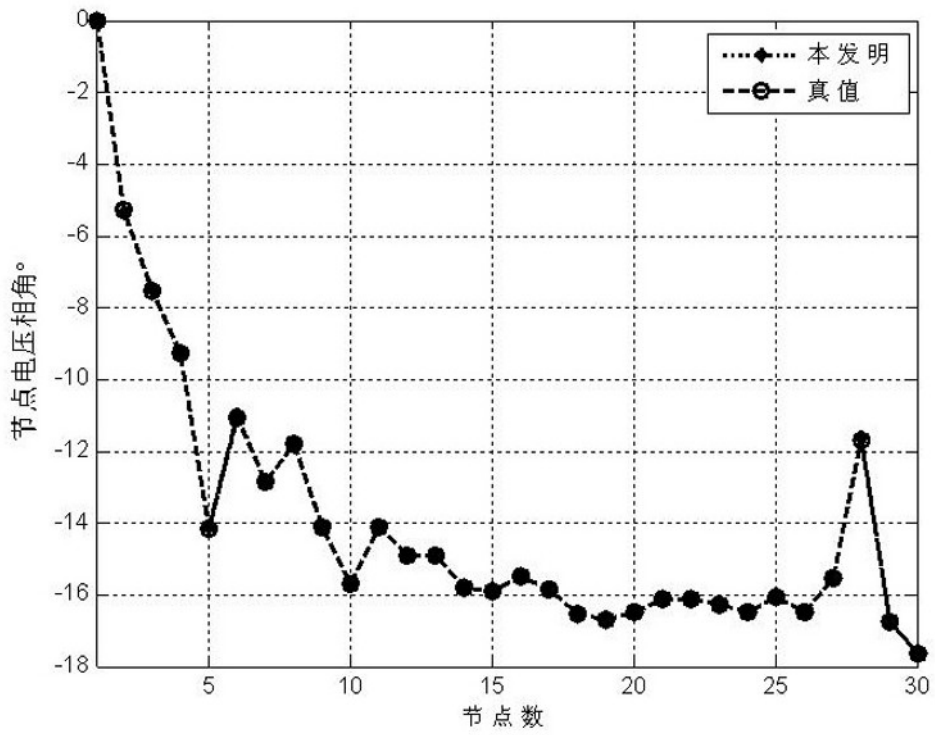


图8