

# 基于混合注入模型的光伏并网潮流计算研究

王立国, 刘宝柱

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

## Research on Power Flow Calculation of Hybrid Injection Model Based on PV Grid-connected Power System

WANG Ligu, LIU Baozhu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**摘 要:** 首先提出将光伏电站计入网络参数的潮流计算策略, 充分考虑光伏电站及电网的相互影响, 通过一次计算同时得到光伏电站、电网两部分的潮流结果。针对光伏电站并入输电问题, 提出光伏电站网络化简策略, 减少网络节点增加个数, 减小雅克比矩阵增大规模。求解潮流时, 提出基于电流/功率混合注入模型的牛顿-拉夫逊(N-R)潮流算法。该算法既继承了常规电流注入模型迭代时, 雅克比矩阵PQ节点分块矩阵的非对角元素恒定不变的优点, 又降低了雅克比矩阵的规模, 节省存储空间。针对混合注入模型的混合坐标问题, 提出坐标转换策略, 将潮流方程右侧均转换到同一坐标下, 使潮流方程变得整齐, 程序编写方便。最后, 从青海某光伏电站中选出4路光伏阵列并网线路接入IEEE30节点系统, 基于其实际参数, 进行并网潮流计算, 验证了本文算法的可行性。

**关键词:** 光伏电站; 并网; 潮流计算; 电流注入模型; 功率注入模型; N-R

**Abstract:** A power flow calculation strategy with network parameters of PV stations is put forward, the interaction between PV station and power grid is taken into consideration, and power flow results of PV station and power grid are obtained through once calculation. As for PV grid-connected power grid, PV station network simplification strategy is proposed to decrease network nodes and to reduce the scale of Jacobian matrix. When solving power flow equations, a N-R power flow calculation algorithm is put forward based on current/power hybrid injection model, which not only inherits the advantage that the non-diagonal elements of PQ node block in Jacobian matrix keeping constant during the iteration of the conventional current injection model, but al-

so reduces Jacobian matrix scale, which save the storage space. By considering of the hybrid coordinate issues of hybrid injection model, a coordinate conversion strategy is presented to convert the right parts of power flow equations to those in same coordinate, which make the power flow equations more orderly and more convenient to encode programs. In the end, by taking the IEEE30 system with a 4 PV arrays from a certain PV station in Qinghai is used as example, power flow calculation is performed based on the actual parameters to the feasibility of proposed algorithm.

**Keywords:** PV station; grid connected; power flow calculation; current injection model; power injection model; N-R

## 0 引 言

近年来, 兆瓦级大型光伏电站相继涌现。随着光伏电站容量的不断增大, 大规模集中式高压并入输电网势必成为未来发展趋势。大规模光伏电站集中并网会对电网的潮流、网络损耗等带来不可忽视的影响。此外, 光伏电站在储能的配合下可以有效参与电网的调峰<sup>[1]</sup>调频工作, 在未来, 当光伏电站的容量足够大时, 一方面为了使光伏电站产生的电能尽可能多的送入电网, 另一方面又能使光伏电站能很好地实现调峰调频功能, 有必要了解光伏电站内部光伏阵列潮流对并网系统潮流的影响, 以给光伏电站制定调度计划提供理论依据, 这样光伏电站在减少出力时, 就可以视情况切掉部分光伏阵列, 而不是全部停机。因此, 在潮流计算过程中计入光伏电站参数, 充分考虑到光伏电站潮流和电网潮流的相互影响是十分必要的。

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)  
(2011AA05A301)

目前,针对光伏电站并网潮流计算的研究基本都是针对配电网而开展<sup>[2-7]</sup>,大多针对配网中传统N-R法对网络电压初值敏感、雅克比矩阵奇异<sup>[2-3]</sup>,前推回代算法对PU节点、环网失效<sup>[4-5]</sup>等问题提出改进策略。文献[6-7]分别针对弱环配网、三相不平衡配电网潮流问题,基于回路分析法提出相应潮流算法。然而,对于光伏电站接入输电网情形,上述潮流算法则会变得适应性较差,且计算效率低。针对光伏电站接入输电网情形,可以将光伏电站于并网点处等值为PQ节点,再进行常规输电网潮流计算,但这种方法只能获得光伏电站对电网运行状态的影响,无法得到光伏电站自身的状态。文献[8]建立了光伏电站并网系统的数学模型,并与电网潮流计算交替迭代,求解潮流,这种方法虽能同时获得光伏电站和电网两方面的状态信息,但增加了算法的迭代次数,影响计算速度。

本文研究了大型光伏电站并入输电网的电力网络潮流算法。将光伏电站计入网络参数,提出光伏电站化简策略和基于混合注入模型的N-R潮流算法。为评估光伏电站内部各光伏阵列对并网系统潮流的影响,光伏电站的规划、运行等提供有力的理论分析工具。

## 1 光伏电站内部模型及化简策略

### 1.1 光伏电站并网系统基本结构及等值电路

假设光伏电站含有 $d$ 个光伏阵列,忽略光伏电站中的汇流箱、无功补偿设备等,其并网简化接线图如图1所示。

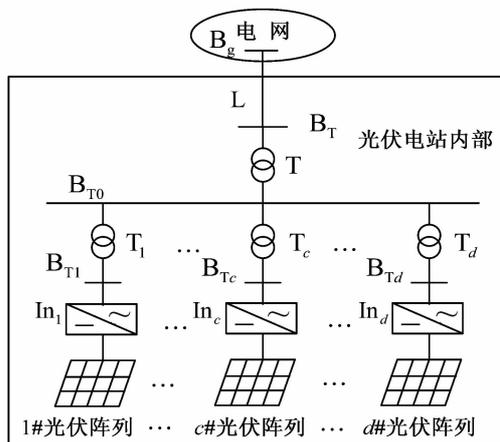


图1 光伏电站并网简化接线图

其中,  $B_g$ 为光伏电站并网母线;  $L$ 为主变至并

网点的输电线路;  $B_T$ 为主变与输电线 $L$ 的连接点;  $T$ 为光伏电站主变,高压侧一般为110kV或220kV;  $B_{T0}$ 为各升压变压器汇集节点;  $T_1 \sim T_d$ 为升压变压器,高压侧一般为10kV或35kV;  $B_{T1} \sim B_{Td}$ 为逆变器输出节点;  $In_1 \sim In_d$ 为并网逆变器。

忽略输电线路 $L$ 和变压器等直接地支路,光伏电站并网系统交流潮流部分等值电路如图2所示。其中,  $Y_g$ 为电网侧的节点导纳矩阵;  $y_L$ 为线路 $L$ 的等值导纳;  $y_{T0} \sim y_{Td}$ 为各变压器的等值导纳。

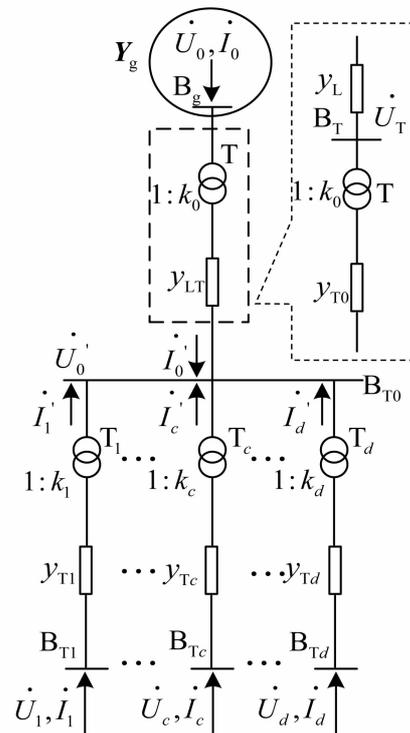


图2 光伏电站并网交流潮流部分等值电路图

实际光伏电站中,组成每个光伏阵列的光伏组件型号、参数受天气条件的影响基本相同。评估光伏阵列对并网系统潮流的影响,没有必要计及逆变器之前的元件,考虑到逆变器之后的潮流就能满足分析要求。因此,本文从并网逆变器输出端开始计入网络参数,将逆变器的输出端作为网络的一个节点,进行并网潮流计算。

由青海某光伏电站运行实际可知,并网逆变器的输出电压基本保持恒定,且对于特定的光照强度和环境温度,逆变器输出的有功功率为定值,而且很容易得到。因此可以将逆变器的输出端看作PU节点参与潮流计算。这样,图2所示的光伏电站将含有 $d$ 个PU节点。

## 1.2 光伏电站内部简化策略

随着大量逆变器输出节点计入电网潮流计算参数，网络中的节点数目增多，节点导纳矩阵和雅克比矩阵规模增大。为减轻这些影响，可以考虑消去光伏电站中的一些非必要节点，对光伏电站内部网络进行化简。

由图 2 不难看出， $B_T$  和  $B_{T0}$  是联络节点，除变压器支路没有连接任何其他电源或负荷，可以消去。

### ① 消去节点 $B_T$

将  $y_L$  和  $y_{T0}$  等值成一个导纳支路  $y_{LT}$ ，即可消去节点  $B_T$ 。 $y_{LT}$  的表达式为

$$y_{LT} = \frac{k_0^2 y_L y_{T0}}{k_0^2 y_L + y_{T0}}$$

由电路关系可推得

$$\dot{U}_T = \frac{1}{k_0 y_L + \frac{y_{T0}}{k_0}} [y_{T0} \quad k_0 y_L] \begin{bmatrix} \dot{U}'_0 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix}$$

### ② 消去节点 $B_{T0}$

列写各变压器支路高、低压侧电流方程，并运用基尔霍夫电流定律，消去变量  $I'_0 \sim I'_d$ ，可得

$$\mathbf{I}_{PV} = [\mathbf{Y}_1 \quad \mathbf{Y}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{PV} \\ \mathbf{U}'_0 \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_1 \mathbf{U}_{PV} + \mathbf{Y}_2 \mathbf{U}'_0 \quad (1)$$

式中： $\mathbf{I}_{PV} = [I'_0 \quad I'_1 \quad \dots \quad I'_c \quad \dots \quad I'_d]^T$ ；

$\mathbf{U}_{PV} = [U'_0 \quad U'_1 \quad \dots \quad U'_c \quad \dots \quad U'_d]^T$ ；

$\mathbf{Y}_1 = \text{diag} \{y_{LT}/k_0^2 \quad y_{T1} \quad \dots \quad y_{Tc} \quad \dots \quad y_{Td}\}$ ；

$\mathbf{Y}_2 = -\begin{bmatrix} \frac{y_{LT}}{k_0} & \frac{y_{T1}}{k_1} & \dots & \frac{y_{Tc}}{k_c} & \dots & \frac{y_{Td}}{k_d} \end{bmatrix}^T$ 。

根据图 2，由电路关系可推得

$$\mathbf{U}'_0 = -\frac{1}{y_\Sigma} \mathbf{Y}_2^T \mathbf{U}_{PV} \quad (2)$$

式中： $y_\Sigma = y_{LT} + \sum_{m=1}^d \frac{y_{Tm}}{k_m^2}$

将式(2)代入式(1)，有

$$\mathbf{I}_{PV} = \left( \mathbf{Y}_1 - \frac{1}{y_\Sigma} \mathbf{Y}_2 \mathbf{Y}_2^T \right) \mathbf{U}_{PV} = \mathbf{Y}_{PV} \mathbf{U}_{PV} \quad (3)$$

式中： $\mathbf{Y}_{PV} = \mathbf{Y}_1 - \frac{1}{y_\Sigma} \mathbf{Y}_2 \mathbf{Y}_2^T$ 。

式(3)即为消去了节点  $B_T$  和  $B_{T0}$  的光伏电站内部节点电压方程。

另外，光伏电站实际规划建设中，相同电气参数的光伏阵列，一般会选择型号相同或电参数相近的逆变器进行并网。这些逆变器实际工作时，输出电压基本相同，因而可以将这些逆变器输出节点合

并<sup>[9]</sup>，以进一步减少网络节点，降低节点导纳矩阵和雅可比矩阵的规模。

令最终化简后的光伏电站内部的节点导纳矩阵为  $\mathbf{Y}_p$ ，节点电压列向量为  $\mathbf{U}_p$ ，节点注入电流列向量为  $\mathbf{I}_p$ ，电网侧的节点电压列向量为  $\mathbf{U}_g$ ，节点注入电流列向量  $\mathbf{I}_g$ ，则整个光伏电站并网系统的节点电压方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_g & \mathbf{Y}_{gp} \\ -\mathbf{Y}_{pg} & \mathbf{Y}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_g \\ \mathbf{U}_p \end{bmatrix}$$

式中： $\mathbf{Y}_{gp} = \mathbf{Y}_{pg} = \mathbf{0}$ 。

其中电网和光伏电站的节点导纳矩阵都含有并网节点  $B_g$ ，可以在并网节点处进行短路收缩，获得整个网络的节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}$  和节点电压方程。

## 2 混合注入模型 N-R 潮流算法

常用的输电网潮流算法中，功率注入模型 N-R 法收敛性好，但每次迭代需重新生成雅克比矩阵，增加运算量。快速解耦法对于 R/X 较大的病态网络失效<sup>[10]</sup>。电流注入模型 N-R 法同时具有前述两种算法的优点，并克服了二者的不足<sup>[11]</sup>。本文在常规电流注入模型基础上，对 PU 节点列写极坐标下的有功功率不平衡方程，提出基于电流/功率混合注入模型的 N-R 潮流算法，进一步减少存储容量需求，且 PU 节点越多，该算法的优势越明显，尤其是针对有大型光伏电站并网的系统。

### 2.1 混合注入模型潮流方程

设网络中含有  $n$  个节点，待求的状态变量为

$$\mathbf{x} = [\mathbf{e}^T \quad \mathbf{f}^T \quad \boldsymbol{\theta}^T]^T$$

式中： $\mathbf{e}$  为 PQ 节点电压实部列向量； $\mathbf{f}$  为 PQ 节点电压虚部列向量； $\boldsymbol{\theta}$  为 PU 节点电压相角列向量。

#### 2.1.1 PQ 节点潮流方程

对于 PQ 节点  $i$ ，其复功率方程为

$$S_i = \dot{U}_i \dot{I}_i^* \Rightarrow \dot{I}_i^* = \frac{S_i}{\dot{U}_i} = \frac{P_i + jQ_i}{e_i + jf_i} = I_{re,i} - jI_{im,i} \quad (4)$$

式中： $S_i$ 、 $P_i$ 、 $Q_i$  分别为注入节点  $i$  的复功率、有功功率和无功功率； $\dot{U}_i$  和  $\dot{I}_i$  分别为节点  $i$  的电压相量和注入电流相量； $e_i$  和  $f_i$  分别为节点  $i$  的电压实部和虚部； $I_{re,i}$  和  $I_{im,i}$  分别为节点  $i$  注入电流的实部和虚部。由式(4)有

$$I_{re,i} = \frac{P_i e_i + Q_i f_i}{e_i^2 + f_i^2}, I_{im,i} = \frac{P_i f_i - Q_i e_i}{e_i^2 + f_i^2} \quad (5)$$

节点  $i$  的电流方程为

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j = \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} + jB_{ij}) (e_j + jf_j) + \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} + jB_{ij}) U_j e^{j\theta_j} \quad (6)$$

式中:  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵第  $i$  行第  $j$  列对应元素的实部和虚部;  $\theta_j$  为 PU 节点  $j$  的电压相角。由式(6)有

$$\begin{cases} I_{\text{re},i} = \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + \sum_{j \in \text{PU}} U_j (G_{ij} \cos \theta_j - B_{ij} \sin \theta_j) \\ I_{\text{im},i} = \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) + \sum_{j \in \text{PU}} U_j (G_{ij} \sin \theta_j + B_{ij} \cos \theta_j) \end{cases} \quad (7)$$

由式(5)和(7), 可得 PQ 节点  $i$  的电流不平衡方程为

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{re},i} = \frac{P_{i,\text{sp}} e_i + Q_{i,\text{sp}} f_i}{e_i^2 + f_i^2} - \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - \sum_{j \in \text{PU}} U_j (G_{ij} \cos \theta_j - B_{ij} \sin \theta_j) \\ \Delta I_{\text{im},i} = \frac{P_{i,\text{sp}} f_i - Q_{i,\text{sp}} e_i}{e_i^2 + f_i^2} - \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) - \sum_{j \in \text{PU}} U_j (G_{ij} \sin \theta_j + B_{ij} \cos \theta_j) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\Delta I_{\text{re},i}$  和  $\Delta I_{\text{im},i}$  分别为注入节点  $i$  注入电流的实部和虚部不平衡量;  $P_{i,\text{sp}}$  和  $Q_{i,\text{sp}}$  分别为注入节点  $i$  的有功功率和无功功率的给定值。

### 2.1.2 PU 节点潮流方程

对于 PU 节点  $i$ , 其有功功率方程为

$$P_i = U_i \left[ \cos \theta_i \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - \sin \theta_i \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right] +$$

$$U_i \sum_{j \in \text{PU}} U_j [G_{ij} \cos (\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin (\theta_i - \theta_j)]$$

有功功率的不平衡方程为

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{i,\text{sp}} - U_i \sum_{j \in \text{PU}} U_j [G_{ij} \cos (\theta_i - \theta_j) + \\ & B_{ij} \sin (\theta_i - \theta_j)] - U_i [\cos \theta_i \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - \\ & \sin \theta_i \sum_{j \in \text{PU}} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)] \end{aligned} \quad (9)$$

综合 2.1.1 和 2.1.2, 电流/功率混合注入模型潮流方程为

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} \Delta I_{\text{re}} \\ \Delta I_{\text{im}} \\ \Delta \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{re},\text{sp}} - \mathbf{I}_{\text{re}} \\ \mathbf{I}_{\text{im},\text{sp}} - \mathbf{I}_{\text{im}} \\ \mathbf{P}_{\text{sp}} - \mathbf{P} \end{bmatrix} \quad (10) \\ \mathbf{J} &= \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^T} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_J & \mathbf{M}_J & \mathbf{N}_J \\ \mathbf{H}_J & \mathbf{W}_J & \mathbf{X}_J \\ \mathbf{R}_J & \mathbf{S}_J & \mathbf{T}_J \end{bmatrix} = \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{\text{re}}}{\partial \mathbf{e}^T} & \frac{\partial \Delta I_{\text{re}}}{\partial \mathbf{f}^T} & \frac{\partial \Delta I_{\text{re}}}{\partial \boldsymbol{\theta}^T} \\ \frac{\partial \Delta I_{\text{im}}}{\partial \mathbf{e}^T} & \frac{\partial \Delta I_{\text{im}}}{\partial \mathbf{f}^T} & \frac{\partial \Delta I_{\text{im}}}{\partial \boldsymbol{\theta}^T} \\ \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \mathbf{e}^T} & \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \mathbf{f}^T} & \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}^T} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中各子块元素如下( $i \neq j$ ):

$$\mathbf{F}_J \text{ 阵: } \begin{cases} F_{Jii} = \partial \Delta I_{\text{re},i} / \partial e_i = a_i - G_{ii} \\ F_{Jij} = \partial \Delta I_{\text{re},i} / \partial e_j = -G_{ij} \end{cases}$$

$$\mathbf{M}_J \text{ 阵: } \begin{cases} M_{Jii} = \partial \Delta I_{\text{re},i} / \partial f_i = b_i + B_{ii} \\ M_{Jij} = \partial \Delta I_{\text{re},i} / \partial f_j = B_{ij} \end{cases}$$

$$\mathbf{N}_J \text{ 阵: } N_{Jij} = \partial \Delta I_{\text{re},i} / \partial \theta_j = U_j (G_{ij} \sin \theta_j + B_{ij} \cos \theta_j)$$

$$\mathbf{H}_J \text{ 阵: } \begin{cases} H_{Jii} = \partial \Delta I_{\text{im},i} / \partial e_i = b_i - B_{ii} \\ H_{Jij} = \partial \Delta I_{\text{im},i} / \partial e_j = -B_{ij} \end{cases}$$

$$\mathbf{W}_J \text{ 阵: } \begin{cases} W_{Jii} = \partial \Delta I_{\text{im},i} / \partial f_i = -a_i - G_{ii} \\ W_{Jij} = \partial \Delta I_{\text{im},i} / \partial f_j = -G_{ij} \end{cases}$$

$$\mathbf{X}_J \text{ 阵: } X_{Jij} = \partial \Delta I_{\text{im},i} / \partial \theta_j = U_j (B_{ij} \sin \theta_j - G_{ij} \cos \theta_j)$$

$$\mathbf{R}_J \text{ 阵: } R_{Jij} = \partial \Delta P_i / \partial e_j = -U_i (G_{ij} \cos \theta_i + B_{ij} \sin \theta_i)$$

$$\mathbf{S}_J \text{ 阵: } S_{Jij} = \partial \Delta P_i / \partial f_j = U_i (B_{ij} \cos \theta_i - G_{ij} \sin \theta_i)$$

$\mathbf{T}_J$  阵:

$$\begin{cases} T_{Jii} = \partial \Delta P_i / \partial \theta_i = \\ U_i \sum_{j \in \text{PU}} U_j (G_{ij} \sin (\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos (\theta_i - \theta_j)) + \\ U_i \sum_{j \in \text{PU}} (\sin \theta_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - \cos \theta_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)) \\ T_{Jij} = \partial \Delta P_i / \partial \theta_j = \\ U_i U_j (B_{ij} \cos (\theta_i - \theta_j) - G_{ij} \sin (\theta_i - \theta_j)) \end{cases}$$

$$\text{式中: } a_i = \frac{P_{i,\text{sp}} (f_i^2 - e_i^2) - 2Q_{i,\text{sp}} e_i f_i}{(e_i^2 + f_i^2)^2},$$

$$b_i = \frac{Q_{i,\text{sp}} (e_i^2 - f_i^2) - 2P_{i,\text{sp}} e_i f_i}{(e_i^2 + f_i^2)^2}.$$

用式(10)和(11)可求得状态变量的修正量

$$\Delta \mathbf{x} = [\Delta \mathbf{e}^T \quad \Delta \mathbf{f}^T \quad \Delta \boldsymbol{\theta}^T]^T = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (12)$$

用  $\Delta \mathbf{x}$  修正  $\mathbf{x}$ , 再进行迭代计算, 直到满足潮流收敛要求。

至此, 混合注入模型 N-R 潮流算法的模型已经完整。该模型中 PQ 节点的分块矩阵  $\mathbf{F}_J$ 、 $\mathbf{M}_J$ 、 $\mathbf{H}_J$  和  $\mathbf{W}_J$  中的非对角元素为常数, 继承了常规直角坐标电流注入模型不必每次迭代都更新这些元素的优点<sup>[11]</sup>, 同时又降低了潮流计算过程中雅克比矩阵的规模。且网络中 PU 节点的数目越多, 雅克比矩阵规模降低越可观, 大大降低了计算机内存的开销, 减少了雅克比矩阵奇异的风险和求逆过程中的计算量。在光伏电站并网系统的潮流计算中, 光伏

电站的加入恰恰会引入很多 PU 节点，因此用混合注入模型对并网系统进行潮流计算是很有优势的。

观察混合注入模型的潮流方程，式(8)、(9)以及分块矩阵  $N_j$ 、 $X_j$ 、 $R_j$ 、 $S_j$  和  $T_j$  等号右侧表达式中含有混合坐标的状态变量，这既影响了潮流方程的整齐性，又使编写潮流程序变得复杂，增加潮流计算时间，淹没了混合注入模型的优点。

## 2.2 混合注入模型潮流方程坐标转换策略

节点电压在直角坐标和极坐标下的转换关系式为

$$e_i = U_i \cos \theta_i, f_i = U_i \sin \theta_i \quad (13)$$

将式(13)代入式(8)、(9)以及分块矩阵  $N_j$ 、 $X_j$ 、 $R_j$ 、 $S_j$  和  $T_j$  中，整理得到：

PQ 节点  $i$  电流实部、虚部不平衡方程：

$$\begin{cases} \Delta I_{\text{re},i} = \frac{P_{i,\text{sp}} e_i + Q_{i,\text{sp}} f_i}{e_i^2 + f_i^2} - \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) \\ \Delta I_{\text{im},i} = \frac{P_{i,\text{sp}} f_i - Q_{i,\text{sp}} e_i}{e_i^2 + f_i^2} - \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases}$$

PU 节点  $i$  有功功率不平衡方程：

$$\Delta P_i = P_{i,\text{sp}} - \left[ e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \right]$$

$N_j$  阵： $N_{ij} = f_j G_{ij} + e_j B_{ij}$

$X_j$  阵： $X_{ij} = f_j B_{ij} - e_j G_{ij}$

$R_j$  阵： $R_{ij} = -e_i G_{ij} - f_i B_{ij}$

$S_j$  阵： $S_{ij} = e_i B_{ij} - f_i G_{ij}$

$T_j$  阵：

$$\begin{cases} T_{ji} = -e_i \sum_{j=1}^n (e_j B_{ij} + f_j G_{ij}) + \\ f_i \sum_{j=1}^n (f_j B_{ij} - e_j G_{ij}) + U_i^2 B_{ii} \\ T_{ij} = e_i (e_j B_{ij} + f_j G_{ij}) + f_i (f_j B_{ij} - e_j G_{ij}) = \\ e_i N_{ij} + f_i X_{ij} \end{cases}$$

至此，得到坐标转换后的直角坐标下的混合注入模型潮流方程。潮流方程中不再有极坐标的状态变量，公式变得整齐、简洁，且利于程序的实现。

## 3 光伏电站并网系统潮流计算流程

光伏电站并网系统潮流计算流程如下：

Step1: 输入光伏电站、电网参数，形成并网系统节点导纳矩阵。

Step2: 设置初始值。

Step3: 按照 2.1 节求取式(10)~式(12)。

Step4: 判断潮流是否满足收敛要求或达到最大迭代次数。如果满足收敛要求，执行 Step6；如果不满足收敛要求，且达到最大迭代次数，则潮流发散，终止计算；否则，执行 Step5。

Step5: 修正状态变量，跳转执行 Step3。

Step6: 求取平衡节点注入有功功率和无功功率，PU 节点无功功率、各支路潮流分布及损耗、光伏电站内部消去节点的电压相量。

Step7: 终止计算，输出潮流计算结果。

## 4 算例验证

### 4.1 混合注入模型 N-R 算法验证

利用 Matlab 2010b 编程软件分别编写常规直角坐标电流注入模型潮流计算程序<sup>[12]</sup> (记为算法 A)和电流/功率混合注入模型潮流计算程序 (记为算法 B)，以 IEEE 14、30、57、118 和 300 节点经典算例作为测试系统，重点比较分析两种算法的潮流计算时间和雅克比矩阵规模，见表 1。

表 1 两种潮流算法性能比较

测试系统	计算时间/s		雅克比矩阵规模	
	算法 A	算法 B	算法 A	算法 B
IEEE14	0.001 1	0.001 0	26×26	22×22
IEEE30	0.003 8	0.003 9	58×58	53×53
IEEE57	0.006 4	0.006 5	112×112	106×106
IEEE118	0.030 1	0.030 8	234×234	181×181
IEEE300	0.418 2	0.430 1	598×598	530×530

经测试，两种算法的潮程序均能得到准确的潮流结果。由表 1 可知，两种算法计算时间基本相同，但算法 B 的雅克比矩阵的规模要小于算法 A。5 个测试系统中 PU 节点个数分别为 4、5、6、53 和 68。经计算，算法 B 节省的存储空间分别为 192、555、1 308、21 995 和 76 704 个，可见 PU 节点越多，雅克比矩阵规模降低越可观，节省的存储空间越多，由此验证了电流/功率混合注入模型 N-R 潮流算法的优越性、准确性和有效性。

### 4.2 光伏电站并网系统潮流计算验证

任选青海某光伏电站中的 4 列光伏阵列 (将其编号为 1#~4#) 组成光伏电站，接入 IEEE30 节点经典算例的 7# 节点。并网系统的等值电路参数

如表2所示。潮流计算采用标么制,系统的基准容量为100MW。

表2 并网系统等值电路参数(标么值)

参数	参数值	参数	参数值
$y_L$	10.542 9-j8.954 8	$U_1$	1.094 3
$y_{T0}$	0.202 6-j5.806 9	$U_2$	1.031 5
$y_{T1}$	0.039 3-j0.216 8	$U_3$	1.082 4
$y_{T2}$	0.039 2-j0.381 2	$U_4$	1.035 6
$y_{T3}$	0.039 3-j0.257 2	$P_1$	0.004 6
$y_{T4}$	0.039 2-j0.341 5	$P_2$	0.003 6
$k_0$	0.916 7	$P_3$	0.004 8
$k_1 \sim k_4$	1.000 0	$P_4$	0.003 9

执行潮流计算程序,迭代3次后潮流收敛,计算时间约为0.009s。

表3~表5分别给出了电网侧、光伏电站侧潮流计算结果,以及光伏电站侧各支路损耗。

表3 电网侧潮流计算结果(标么值)

节点	电压幅值	电压相角/(°)	节点有功	节点无功
1	1.060 0	0.000 0	1.367 9	0.052 0
2	1.043 0	-2.647 0	0.358 6	0.061 9
3	1.030 6	-4.388 3	-0.024 0	-0.012 0
4	1.023 4	-5.250 8	-0.076 0	-0.016 0
5	1.010 0	-8.750 5	-0.696 4	0.075 2
6	1.015 3	-6.063 2	0.000 0	0.000 0
7	1.003 5	-7.606 3	-0.228 0	-0.109 0
8	1.010 0	-5.955 9	0.050 0	-0.167 5
9	1.049 7	-7.776 6	0.000 0	0.000 0
10	1.043 3	-9.677 0	-0.058 0	-0.020 0
11	1.082 0	-5.894 9	0.179 3	0.171 0
12	1.044 9	-8.848 0	-0.112 0	-0.075 0
13	1.071 0	-7.635 9	0.169 1	0.201 6
14	1.031 4	-9.762 0	-0.062 0	-0.016 0
15	1.028 1	-9.890 3	-0.082 0	-0.025 0
16	1.036 9	-9.484 0	-0.035 0	-0.018 0
17	1.036 0	-9.831 2	-0.090 0	-0.058 0
18	1.021 3	-10.519 4	-0.032 0	-0.009 0

续表3

节点	电压幅值	电压相角/(°)	节点有功	节点无功
19	1.020 4	-10.698 3	-0.095 0	-0.034 0
20	1.025 3	-10.501 7	-0.022 0	-0.007 0
21	1.030 8	-10.142 1	-0.175 0	-0.112 0
22	1.031 3	-10.134 5	0.000 0	0.000 0
23	1.020 7	-10.341 0	-0.032 0	-0.016 0
24	1.019 2	-10.590 5	-0.087 0	-0.067 0
25	1.020 4	-10.467 1	0.000 0	0.000 0
26	1.002 8	-10.884 2	-0.035 0	-0.023 0
27	1.029 8	-10.127 4	0.000 0	0.000 0
28	1.009 8	-6.461 4	0.000 0	0.000 0
29	1.010 1	-11.341 5	-0.024 0	-0.009 0
30	0.998 7	-12.212 6	-0.106 0	-0.019 0

表4 光伏电站内部潮流计算结果(标么值)

节点	电压幅值	电压相角/(°)	节点有功	节点无功
$B_{T_1}$	1.094 3	-6.325 3	0.004 6	0.001 1
$B_{T_2}$	1.031 5	-6.491 4	0.003 6	-0.022 2
$B_{T_3}$	1.082 4	-6.330 7	0.004 8	-0.001 9
$B_{T_4}$	1.035 6	-6.383 0	0.003 9	-0.018 7
$B_{T_0}$	1.086 5	-7.272 1	0	0
$B_T$	1.002 3	-7.422 8	0	0

表5 光伏电站内部各支路损耗(标么值)

支路	有功损耗	无功损耗
输电线L	$2.361 4 \times 10^{-6}$	$6.769 4 \times 10^{-5}$
T支路	$1.124 7 \times 10^{-5}$	$3.224 1 \times 10^{-4}$
$T_1$ 支路	$1.512 9 \times 10^{-5}$	$8.345 8 \times 10^{-5}$
$T_2$ 支路	0.000 1	0.001 2
$T_3$ 支路	$1.315 1 \times 10^{-5}$	$8.606 6 \times 10^{-5}$
$T_4$ 支路	$1.123 4 \times 10^{-4}$	$9.786 6 \times 10^{-4}$

由表3~表5可知,通过一次潮流计算同时得到了光伏电站和电网两部分的潮流分布,充分考虑了光伏电站和电网的相互影响。由此验证了本文计入光伏电站参数的潮流算法的可行性。

## 5 结论

本文提出了一种光伏电站并网系统的潮流计算

策略。将光伏电站计入网络参数，充分考虑光伏电站和电网两部分的相互影响。求解潮流时，基于混合注入模型列写潮流方程，采用 N-R 法迭代求解，既保证了潮流计算的速度，又进一步节省了内存。为开展大型光伏电站并网运行特性的实证研究提供了一个有效的技术工具。

### 参 考 文 献

- [1] 黎永华. 结合储能的并网光伏发电对调峰作用的分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [2] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.
- [3] 杨旭英, 段建东, 杨文宇, 等. 含分布式发电的配电网潮流计算 [J]. 电网技术, 2009, 33(18): 139-143.
- [4] 丁明, 郭学风. 含多种分布式电源的弱环配网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 35-40.
- [5] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-129.
- [6] 李红伟, 张安安. 含 PV 型分布式电源的弱环配网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 128-135.
- [7] 李红伟, 孙宏斌, 张安安, 等. 基于正序分量的含 PV 节点的三相配网潮流算法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 115-121.
- [8] 王一波, 伍春生, 廖华, 等. 大型并网光伏发电系统稳态模型与潮流分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(8): 1093-1097.
- [9] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [10] 栗超. 电流注入模型牛顿法潮流计算的研究及其应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [11] 彭世康, 王永刚, 余志文, 等. 极坐标形式的电流注入型潮流算法 [J]. 继电器, 2000, 28(3): 1-4.
- [12] 杭乃善, 姚元玺, 窦婷婷, 等. 基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法研究 [J]. 继电器, 2005, 33(4): 9-11.

收稿日期: 2013-04-03

作者简介:

王立国(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事大型光伏电站运行数据的智能处理及其应用方面的研究, E-mail: wlg65070604@163.com;

刘宝柱(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统分析与控制、新能源发电与智能电网方面的研究, E-mail: bzliu@ncepu.edu.cn.

(责任编辑: 林海文)