

# 基于广义 Tellegen 定理的小扰动定理在含光伏源的电力系统潮流算法中的应用研究

江明颖<sup>1</sup>, 鲁宝春<sup>1</sup>, 姜丕杰<sup>1</sup>, 于常武<sup>2</sup>

(1. 辽宁工业大学电气工程学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 辽宁工业大学化学与环境工程学院, 辽宁 锦州 121001)

**摘要:** 广义 Tellegen 定理与物理系统属性无关, 只与物理系统所建立的数学模型有关, 因而被广泛地应用于电力系统中。考虑光伏并网影响因素, 将光伏系统视为 PQ 节点, 在电流注入潮流模型的基础上, 利用小扰动定理建立基于广义 Tellegen 定理的修正方程。利用新的修正方程, 以引入光伏源的 IEEE30 节点测试系统为例进行潮流计算。算例分析表明, 该算法的迭代次数及潮流计算速度均有所改善, 同时也表明了广义 Tellegen 定理在含光伏源系统中同样具有重要的应用价值。

**关键词:** 广义 Tellegen 定理; 小扰动定理; 潮流计算

## Applied research on power flow algorithm based on small disturbance theorem of generalized Tellegen's theorem for power system with photovoltaic power

GANG Mingying<sup>1</sup>, LU Baochun<sup>1</sup>, JIANG Pijie<sup>1</sup>, YU Changwu<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. School of Chemical & Environment Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** Generalized Tellegen's theorem is independent of physics attribute and has a bearing on the mathematical models. So it has been applied widely in power system. Considering the photovoltaic grid-connected factors, photovoltaic power can be configured as the PQ node in power flow calculation. According to small disturbance theorem, the new modified equation based on the Generalized Tellegen's theorem is established on current-influx model basis. Then, according to the established the new modified equation, photovoltaic power is connected to the IEEE30 test system of pipeline. Example analysis demonstrates that the new algorithm is superior to traditional algorithm in calculation speed and iteration number, and it also shows that Generalized Tellegen's theorem has important application values in power system with photovoltaic power.

**Key words:** generalized Tellegen's theorem; small disturbance theorem; power flow calculation

中图分类号: TM74

文章编号: 1674-3415(2015)18-0031-06

## 0 引言

在电力系统分析中, 研究系统稳态运行情况的一种基本电气计算就是潮流计算, 传统的潮流算法有很多种, 如: 牛顿拉夫逊法, P-Q 分解法, 保留非线性法等等。然而, 随着光伏发电技术的广泛应用, 具有间歇性与随机性的光伏电源并网后<sup>[1-3]</sup>, 使系统功率及电压分布等发生了新的变化, 故引起系

统潮流的复杂变化<sup>[4-6]</sup>。鉴于此种情况, 国内外许多专家学者针对不同情况, 从不同角度, 对含光伏源的电力系统的潮流算法展开研究。文献[7]提出了一种将光伏发电系统的整体模型与潮流计算交替迭代的方法, 并分析了光伏源对电网电压产生的影响。文献[8]提出了一种保留非线性电流注入型潮流计算方法, 在保证收敛精度的情况下, 提高了运算速度。文献[9]在传统潮流算法基础上, 采用了改进的电流注入型潮流计算方法, 在每次迭代计算中, 不必重新进行因式分解, 该方法计算较简单。

本文考虑光伏并网因素<sup>[10]</sup>, 将光伏源视为一个

**基金项目:** 辽宁省教育厅资助项目 (L2013249); 辽宁工业大学基金项目 (X201209)

新的PQ节点,改进原有的潮流算法,把广义Tellegen定理应用于含光伏源的电力系统潮流计算中。广义Tellegen定理是在传统Tellegen定理的基础上提出的<sup>[9]</sup>,对于任意型如 $A(\mathbf{X})\mathbf{X} = \mathbf{B}(\mathbf{X})$ 的物理系统都适用,它只与物理系统所建立的数学模型有关,而与物理系统的属性无关<sup>[11]</sup>,因此比传统Tellegen定理具有更普遍的意义。本文将广义Tellegen定理的小扰动定理应用于电流注入型潮流计算模型中,利用广义Tellegen定理的小扰动定理推导出潮流计算的修正方程。采用该算法分别对光伏系统接入位置及接入容量不同情况进行了潮流计算。

## 1 基于广义 Tellegen 定理的小扰动定理潮流算法

### 1.1 节点类型的处理

常规电力系统潮流计算中,通常将系统母线分为PQ节点、PV节点和V $\theta$ 节点三大类。而在光伏发电系统中,由于光伏源的接入,致使节点类型的选取与传统发电机节点类型的选取有所不同。

对于节点类型的处理,其目的是将各类节点转换成传统方法能够处理的PQ或PV节点,以便对光伏系统接入电网后的潮流算法进行研究<sup>[12]</sup>。在光伏系统中环境因素对光伏电池的输出功率影响较大<sup>[13]</sup>,为尽可能保证太阳能发电的利用率,本文在潮流计算中将光伏系统设置为PQ节点。

### 1.2 广义 Tellegen 定理的小扰动定理

若 $n \times n$ 阶非线性矩阵 $A(\mathbf{X})$ 和 $\tilde{A}(\tilde{\mathbf{X}})$ 满足

$$A^T(\mathbf{X}) = \tilde{A}(\tilde{\mathbf{X}}) \quad (1)$$

则称 $A(\mathbf{X})$ 和 $\tilde{A}(\tilde{\mathbf{X}})$ 结构互易。若方程组

$$A(\mathbf{X})\mathbf{X} = \mathbf{B}(\mathbf{X}) \quad (2)$$

具有小扰动 $\delta A(\mathbf{X})$ 和 $\delta B(\mathbf{X})$ ,则解的变化 $\delta(\mathbf{X})$ 满足

$$\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\mathbf{X}})\delta(\mathbf{X}) = -\tilde{\mathbf{X}}^T \delta A(\mathbf{X})\mathbf{X} + \tilde{\mathbf{X}}^T \delta B(\mathbf{X}) \quad (3)$$

设已求得方程组(3)的解为 $\mathbf{X}_0$ ,考察 $A(\mathbf{X})$ 和 $B(\mathbf{X})$ 的变化对解的影响。取 $\tilde{A}(\tilde{\mathbf{X}}) = A^T(\mathbf{X}_0)$ , $\tilde{\mathbf{B}}^T(i) = [0, \dots, 1, \dots, 0]$ 。式中 $\tilde{\mathbf{B}}(i)$ 表示 $\tilde{\mathbf{B}}(\tilde{\mathbf{X}})$ 中第 $i$ 个元素为1、其他元素为0的向量。

在 $A(\mathbf{X}_0)$ 非奇异的情况下,求解伴随方程 $\tilde{A}(\tilde{\mathbf{X}})\tilde{\mathbf{X}} = \tilde{\mathbf{B}}^T(\mathbf{X})$ 得 $\tilde{\mathbf{X}}$ ,记做 $\tilde{\mathbf{X}}(i)$ 。这样由小扰动定理可得

$$\delta X_i = -\tilde{\mathbf{X}}^T(i)\delta A(\mathbf{X})\mathbf{X}_0 + \tilde{\mathbf{X}}^T(i)\delta B(\mathbf{X}) \quad (4)$$

若 $A(\mathbf{X})$ 和 $B(\mathbf{X})$ 是非线性的,则需采用数值迭代法求 $\mathbf{X}_0$ ,而 $\tilde{\mathbf{X}}(i)$ 的计算只需要解一次线性方程组即可。

广义 Tellegen 定理只与物理系统所建立的数学模型有关,与该物理系统属性无关<sup>[3]</sup>,因而广泛地应用于电力系统中,其小扰动定理为电力系统潮流计算提供了可能。

### 1.3 电流注入型潮流算法的数学模型

对于电力系统中任意给定的每个节点,由节点方程 $\mathbf{I} = \mathbf{YV}$ 和节点复功率关系式 $\hat{\mathbf{S}} = \hat{\mathbf{V}}\mathbf{I}$ 可以得到

$$\frac{\hat{\mathbf{S}}}{\hat{\mathbf{V}}} = \mathbf{YV} \quad (5)$$

对式(5)求导,得 $\frac{\Delta \hat{\mathbf{S}}}{\hat{\mathbf{V}}} - \frac{\hat{\mathbf{S}}}{\hat{\mathbf{V}}^2} \Delta \hat{\mathbf{V}} = \mathbf{Y} \Delta \mathbf{V}$ ,“ $\hat{\quad}$ ”表示共轭, $\mathbf{Y}$ 为常数矩阵。

对于PQ节点而言,设 $\mathbf{S} = \mathbf{P} + j\mathbf{Q}$ , $\mathbf{V} = e + jf$ ,

$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\mathbf{B}$ ,若设 $\Delta \mathbf{I}' = \frac{\Delta \hat{\mathbf{S}}}{\hat{\mathbf{V}}}$ , $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} \end{bmatrix}$ ,推导后则得出

$$\Delta \mathbf{I}' = (\mathbf{Y} + \mathbf{D}) \Delta \mathbf{V} \quad (6)$$

式(6)即为电流注入型潮流算法的数学模型<sup>[4]</sup>。其中: $\Delta \mathbf{V} = \Delta e + j\Delta f$ , $\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\mathbf{B}$ , $\mathbf{D} = \text{Diag}\{\mathbf{D}_{11}, \mathbf{D}_{22}, \dots, \mathbf{D}_{(n-1)(n-1)}\}$ 是对角块阵,第 $i$ 个对角块元素的取值为

$$\mathbf{D}_{ii} = \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix}$$

其中

$$a = \frac{-\mathbf{Q}(e^2 - f^2) + 2ef\mathbf{P}}{(e^2 + f^2)^2}; \quad b = \frac{\mathbf{P}(e^2 - f^2) + 2ef\mathbf{Q}}{(e^2 + f^2)^2}$$

计算时,对PQ节点而言,其系数矩阵由 $\mathbf{Y} + \mathbf{D}$ 得到,对于PV节点仍按牛顿法潮流中求偏导的方法计算<sup>[13]</sup>。电流注入型潮流算法主要是在雅可比矩阵的求法和节点复功率的计算上发生了变化,既改善了收敛性,又减少了计算量。

下面对PQ节点的修正方程进行求解。

在直角坐标系下,可将 $\Delta \mathbf{I}' = \frac{\Delta \hat{\mathbf{S}}}{\hat{\mathbf{V}}}$ 写成实数形式,如

$$\Delta I_{xi} = \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - \frac{1}{e_i^2 + f_i^2} (e_i P_i + f_i Q_i)$$

$$\Delta I_{yi} = \sum_{j=1}^n (B_{ij}e_j + G_{ij}f_j) - \frac{1}{e_i^2 + f_i^2} (f_i P_i - e_i Q_i)$$

式中: $\hat{\mathbf{V}} = e + jf$ 为网络节点电压向量; $P_i$ 、 $Q_i$ 分

别为节点  $i$  的注入有功功率和注入无功功率;  $y_{ij}$  为节点导纳矩阵元素;  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$  为节点注入电流变化量的实部和虚部; “ $\wedge$ ” 表示共轭。用矩阵表示的修正方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta x_{n-1} \\ \Delta y_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & G_{11} & -B_{12} & G_{12} & \cdots & \cdots & -B_{1,n-1} & G_{1,n-1} \\ G_{11} & B_{11} & G_{12} & B_{12} & \cdots & \cdots & G_{1,n-1} & B_{1,n-1} \\ -B_{21} & G_{21} & B_{22} & G_{22} & \cdots & \cdots & -B_{2,n-1} & G_{2,n-1} \\ G_{21} & B_{21} & G_{22} & B_{22} & \cdots & \cdots & G_{2,n-1} & B_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ -B_{n-1,1} & G_{n-1,1} & -B_{n-1,2} & G_{n-1,2} & \cdots & \cdots & B_{n-1,n-1} & G_{n-1,n-1} \\ G_{n-1,1} & B_{n-1,1} & G_{n-1,2} & B_{n-1,2} & \cdots & \cdots & G_{n-1,n-1} & B_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_2 \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \Delta e_{n-1} \end{bmatrix}$$

式中:

$$B'_{ii} = -\frac{\partial \Delta x_i}{\partial f_i} = -B_{ii} - \frac{Q_i(e_i^2 - f_i^2) - 2e_i f_i P_i}{(e_i^2 + f_i^2)^2} = -B_{ii} + a_i \quad (7)$$

$$G'_{ii} = -\frac{\partial \Delta x_i}{\partial e_i} = G_{ii} - \frac{P_i(f_i^2 - e_i^2) - 2e_i f_i Q_i}{(e_i^2 + f_i^2)^2} = G_{ii} + b_i \quad (8)$$

$$G''_{ii} = -\frac{\partial \Delta y_i}{\partial f_i} = G_{ii} - \frac{P_i(e_i^2 - f_i^2) + 2e_i f_i Q_i}{(e_i^2 + f_i^2)^2} = G_{ii} - b_i \quad (9)$$

$$B''_{ii} = -\frac{\partial \Delta y_i}{\partial e_i} = B_{ii} - \frac{Q_i(e_i^2 - f_i^2) - 2e_i f_i P_i}{(e_i^2 + f_i^2)^2} = B_{ii} + a_i \quad (10)$$

上述是对 PQ 节点修正方程的求解。而在对 PV 节点修正方程进行求解时, 它的一个修正方程式仍然采用注入电流不平衡量, 另一个修正方程式为 PV 节点电压幅值的约束<sup>[14]</sup>, 即采用注入有功功率和节点电压平方的不平衡量形成两个等式, 设 PV 节点修正方程式为

$$\Delta W = J_{PV} \Delta V \quad (11)$$

式中:  $\Delta W$  和  $\Delta V$  都是二维列向量; 其中  $J_{PV}$  中的各元素为

$$\begin{bmatrix} -B_{m+1,1} & G_{m+1,1} & \cdots & \cdots & B'_{m+1,m+1} & G'_{m+1,m+1} & \cdots & \cdots & -B_{m+1,n-1} & G_{m+1,n-1} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & -2f_{m+1} & -2e_{m+1} & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ -B_{n-1,1} & G_{n-1,1} & \cdots & \cdots & -B_{n-1,m+1} & G_{n-1,m+1} & \cdots & \cdots & B'_{n-1,n-1} & G'_{n-1,n-1} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \cdots & \cdots & -2f_{n-1} & -2e_{n-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于 PV 节点, 其无功功率是未知的, 故应在迭代过程中, 根据电压给定值计算出 PV 节点的  $Q$

值, 即将初值  $e_i =$  给定值,  $f_i = 0$  代入式(13)。

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \quad (13)$$

$$(i = m+1, m+2, \dots, n-1)$$

以此为已知量, 在每次迭代过程中更新。

假设电力系统中有  $n$  个节点, 其中, PQ 节点有  $m$  个, 其编号为 1, 2, 3,  $\dots$ ,  $m$ ; 而节点  $m$  之后的都为 PV 节点, 即 PV 节点数为  $n-m-1$  个, 编号为  $m+1, m+2, m+3, \dots, n-1$ ; 第  $n$  节点(最后一个节点)为平衡节点。得出基于电流注入型的牛顿-拉夫逊法修正方程的形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^* & Y_{12} & \cdots & Y_{1,m+1} & \cdots & Y_{1,n-1} \\ Y_{21} & Y_{22}^* & \cdots & Y_{2,m+1} & \cdots & Y_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m+1,1}^{**} & Y_{m+1,2}^{**} & \cdots & Y_{m+1,m+1}^{**} & \cdots & Y_{m+1,n-1}^{**} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n-1,1}^{**} & Y_{n-1,2}^{**} & \cdots & Y_{n-1,m+1}^{**} & \cdots & Y_{n-1,n-1}^{**} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:

$$\Delta I_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$\Delta I'_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta V_i^2 \end{bmatrix} \quad (i = m+1, m+2, \dots, n-1)$$

$$Y_{ii}^* = \begin{bmatrix} -B_{ii} + a_i & G_{ii} + b_i \\ G_{ii} - b_i & B_{ii} + a_i \end{bmatrix}; \quad Y_{ij} = \begin{bmatrix} -B_{ij} & G_{ij} \\ G_{ij} & B_{ij} \end{bmatrix}$$

$$Y_{ii}^{**} = \begin{bmatrix} -B_{ii} + a_i & G_{ii} + b_i \\ -2f_i & -2e_i \end{bmatrix}; \quad Y_{ij}^{**} = \begin{bmatrix} -B_{ij} & G_{ij} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

#### 1.4 基于广义 Tellegen 定理的潮流修正方程

广义 Tellegen 定理对于任意型如  $A(X)X = B(X)$  的物理系统均适用。而电流注入模型  $\Delta I' = (Y + D)\Delta V$  与  $A(X)X = B(X)$  的形式又相同<sup>[14]</sup>, 因此可以在电流注入模型的基础上加入 Tellegen 定理, 利用广义 Tellegen 定理的小扰动定理来推导潮流计算修正方程。由小扰动定理得

$$\delta V_i = -\tilde{V}^T(i) \delta J(V) \Delta V_0 + \tilde{V}^T(i) \delta \Delta I(V) \quad (15)$$

式中, 设  $J(V) = Y + D$ , 其中:  $Y + D$  相当于  $A(X)$ ;  $\Delta V$  相当于  $X$ ;  $\Delta I'$  相当于  $B(X)$ 。令  $\tilde{J}(\tilde{V}) = J^T(V_0)$ ,  $\tilde{B}^T(i) = [0, 0, \dots, 1, 0, \dots, 0, 0]$ 。其中,  $\tilde{V}(i)$  通过求解伴随方程  $\tilde{J}(\tilde{V})\tilde{V} = \tilde{B}^T(i)$  得到,  $\Delta V_0$  由  $\Delta I'_0 = J(V_0)\Delta V_0$  求出。  $\delta \Delta I(V)$  是每次迭代时注入电流的变化量。  $\delta J(V)$  是每次迭代的雅可比矩阵与  $V_0$

对应系统的雅可比矩阵之差，即网络的雅可比矩阵的变化量<sup>[14-15]</sup>。潮流计算过程中，对 $\tilde{J}(\tilde{V})$ ，即 $J^T(V_0)$ 进行一次因子表计算即可得到 $\tilde{V}(i)$ 。在后续迭代中，不需要每次都重新进行因式分解，只需求解 $\delta\Delta I(V)$ 和 $\delta J(V)$ 即可，故使迭代计算量减少，计算时间缩短。

### 2 基于广义 Tellegen 定理潮流计算步骤

在进行潮流计算时，为最大限度地保证太阳能发电的利用率<sup>[16-18]</sup>，本文将光伏系统做为一个新的 PQ 节点处理(即视为 PQ 值已给定的负荷节点)，潮流计算采用标么值，C++语言编程，基于广义 Tellegen 定理的含光伏源的电力系统潮流计算的程序框图如图 1 所示。

### 3 算例分析

将光伏系统视为一个新的 PQ 节点，即在原有的网络结构中增加了一个节点，即在计算潮流时导纳矩阵比原来多了一维。以 IEEE30 节点测试系统为例，形成 31 节点 42 条支路。基于含光伏源电力系统的负荷就近原则，以及光伏发电的特殊性，本文将分别在日照充足、日照不足及无日照三种情况下，分别对节点 7、节点 21 和节点 5(均为重要的负荷节点)处引入光伏源进行潮流计算。

(1) 当光伏源接入位置不同、光照不同时，系统的注入有功功率和有功网损对系统注入有功的比率计算结果，如表 1 所示。

由表 1 可以看出：以光伏系统接入 5 节点为例，当光照充足即光伏源接入容量最大时(100%)，有功网损对系统注入有功的比率为 2.99%；当光照不足时(50%)，比率为 3.12%；当夜晚或没有光照时(接入容量 0%)，比率为 3.30%。故得出，在光伏系统接入相同位置的情况下，光伏接入容量越大，有功网损对系统注入有功的比率值就越小。

(2) 光伏源作为 PQ 节点加入第 7 节点处时，在光伏源投入容量不同的情况下系统的潮流计算结果，如表 2 所示。

在阴雨天或晚上没有光照情况下的潮流计算结果如表 3 所示。

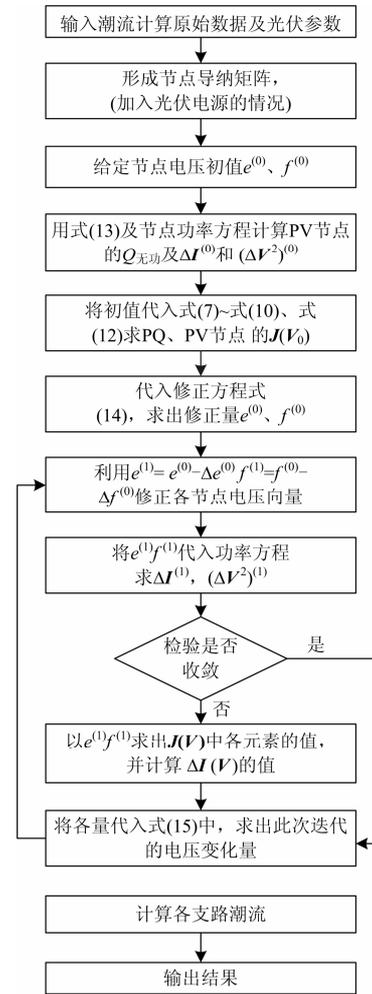


图 1 基于广义 Tellegen 定理光伏系统潮流计算框图  
Fig. 1 Diagram of PV flow calculation based on general Tellegen's theorem

由表 2 和表 3 可以看出：当光伏源接入 7 节点时，系统中各个节点的电压幅值及相角均有所增加，且距离光伏源越近的节点变化越明显。光伏源的接入对系统中各节点电压的改善起到了一定的作用。电力系统的潮流分布受光伏源并网位置及并网容量的影响。对于接近光伏系统的负载来说，光伏系统注入功率的增加减轻了发电机的供电负担，减少了长距离供电而产生的网络损耗。光伏发电系统接入电网后，既有益于提高网络的供电效率，又对电网电压起一定的支撑作用。

表 1 光伏源接入不同节点不同光照下计算结果

Table 1 Calculation results of different nodes and light connected PV system

投入光伏容量	系统注入有功功率/p.u.			有功网损对系统注入有功的比率/%		
	5 节点处	7 节点处	21 节点处	5 节点处	7 节点处	21 节点处
100%充足	2.135 35	2.136 07	2.136 64	2.99	3.03	3.05
50%不足	2.138 19	2.138 51	2.138 72	3.12	3.14	3.15
0%无	2.142 23	2.142 31	2.142 38	3.30	3.31	3.31

表 2 光伏源接在 7 节点处时的潮流计算结果  
Table 2 Calculation results of No. 7 node connected PV system

节点编号	100%(充足)		50%(不足)	
	电压幅值/p.u.	电压相角/p.u.	电压幅值/p.u.	电压相角/p.u.
1	1.05	0	1.05	0
5	1.005 800	-8.382 529	1.005 800	-8.683 987
6	1.021 948	-5.988 128	1.021 937	-6.236 563
7	1.009 384	-7.233 275	1.009 221	-7.653 914
20	1.035 930	-10.356 014	1.035 890	-10.587 366
21	1.040 872	-9.995 661	1.040 824	-10.231 213
22	1.041 405	-9.988 985	1.041 358	-10.224 409
31	1.028 561	-6.405 309	1.022 098	-7.459 538

表 3 无光照情况下的潮流计算结果  
Table 3 Calculation results of no light

节点编号	光伏源 0%(无光照)	
	电压幅值/p.u.	电压相角/p.u.
1	1.05	0
5	1.005 800	-9.005 302
6	1.021 205	-6.478 066
7	1.006 185	-8.024 616
20	1.035 472	-10.816 778
21	1.040 360	-10.463 930
22	1.040 895	-10.457 041
31	1.003 187	-7.797 565

(3) 分别采用电流注入型法和基于广义 Tellegen 定理法进行潮流计算的结果, 如表 4 所示。

表 4 两种算法潮流计算结果对比  
Table 4 Comparison of two power flow algorithms

系统节点数	电流注入法		Tellegen 小扰动定理法	
	迭代时间/s	迭代次数	迭代时间/s	迭代次数
11	0.006	4	0.005	4
30	0.028	5	0.025	5
107	0.569	8	0.497	7

由表 4 可知, 在保证其收敛性及计算结果不受影响的情况下, 基于广义 Tellegen 定理的小扰动定理法计算速度有所提高且迭代次数减少, 由于该方法在迭代计算过程中, 不需要重新对雅可比矩阵进行因式分解, 只需在首次迭代时做一次因式分解即可, 故使求解过程简化。

## 4 结论

本文将广义 Tellegen 定理应用于含光伏源的电力系统的潮流计算中, 验证了光伏源接入电网后, 系统潮流发生了变化, 使电网电压分布产生了一定影响, 分析结果表明: 1) 该算法在保证其收敛性及计算结果不受影响的情况下, 迭代次数及计算速度均有所改善; 2) 光伏系统并网位置及并网容量对电力系统潮流分布均有影响; 3) 光伏系统的接入对系

统中各节点电压的改善及系统网损的降低起到了一定的作用。

## 参考文献

- [1] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [2] 孙红霞, 赵彩宏. 光伏/风电并网测试装置的设计和开发[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 103-109.  
SUN Hongxia, ZHAO Caihong. Design and development of testing for photovoltaic/wind power grid connection[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 103-109.
- [3] 曹哲, 刘波, 袁智强. 高密度分布式光伏发电系统接入配电网准入容量研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 118-122.  
CAO Zhe, LIU Bo, YUAN Zhiqiang. Research on the maximum penetration level of multiple distributed PV generation[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 118-122.
- [4] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于 DIgSILENT 的并网光伏发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 49-55.  
WANG Yixiao, ZHANG Xinchang, LU Jinsheng, et al. Modeling and simulation of grid-connected PV system based on DIgSILENT software[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 49-55.
- [5] 侯玉强, 李威. 大规模光伏接纳对电网安全稳定的影响及相关制约因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 73-77.  
HOU Yuqiang, LI Wei. Influence of integration of large-scale photovoltaic on grid and key factors

- restricting its accepted capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 73-77.
- [6] 韩亮, 王守相. 含光伏风电的基于仿射算法的配电三相潮流计算[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3413-3418.  
HAN Liang, WANG Shouxiang. Affine algorithm based calculation of three-phase flow in distribution network connected with PV generation and wind generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3413-3418.
- [7] 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, 2009, 49(8): 1903-1907.  
WANG Yibo, WU Chunsheng, LIAO Hua, et al. Steady-state power flow analyses of large-scale grid-connected photovoltaic generation system[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(8): 1903-1907.
- [8] 安娜, 鲁宝春, 李宝国. 广义 Tellegen 定理在保留非线性电流注入型潮流计算中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 40-43.  
AN Na, LU Baochun, LI Baoguo. Application of general Tellegen's theorem in retaining-nonlinearity power flow calculation based on current-influx model[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 40-43.
- [9] 牛辉, 郭志忠. 电流注入模型的电力系统潮流计算[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 39-41.  
NIU Hui, GUO Zhizhong. Power flow algorithm based on current-influx model[J]. Power System Technology, 1998, 22(11): 39-41.
- [10] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [11] 鲁宝春, 李宝国, 刘毅, 等. 基于广义 Tellegen 定理的改进连续潮流算法[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 151-153.  
LU Baochun, LI Baoguo, LIU Yi, et al. An improved continuation flow algorithm based on the Generalized Tellegen's theorem[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 151-153.
- [12] 成煜, 杭乃善, 凌武能, 等. 智能电网背景下的节点类型扩展潮流计算[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(10): 31-36.  
CHENG Yu, HANG Naishan, LING Wuneng, et al. Node type expanded flow calculation under the background of smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(10): 31-36.
- [13] 才利存, 常忠廷. 太阳能并网发电系统的 MPPT 及孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 119-124.  
CAI Licun, CHANG Zhongting. MPPT and anti-islanding of photovoltaic grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 119-124.
- [14] 鲁宝春, 刘毅, 马文阁, 等. 广义 Tellegen 定理及其在电力系统中的应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003.
- [15] LU Baochun, WANG Jingli, GUAN Weiguo, et al. Study on voltage stability and control based on network structure analysis method[J]. An International Journal of Research and Surveys, 2013, 7(3): 759-764.
- [16] 江明颖. 基于广义 Tellegen 定理的光伏并网系统潮流算法研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2013.  
GANG Mingying. Study on power flow algorithm of grid-connected photovoltaic system based on the Generalized Tellegen's theorem[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2013.
- [17] 赵向阳, 黄涛. 基于频率特征的微电网孤岛潮流计算[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(9): 43-46.  
ZHAO Xiangyang, HUANG Tao. Power flow calculation of micro-grid islanding operation based on the frequency characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(9): 43-46.
- [18] 陈树恒, 党晓强, 李兴源. 基于广义注入电流节点模型的配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 19-24.  
CHEN Shuheng, DANG Xiaoqiang, LI Xingyuan. Power flow method for distribution network based on generalized injecting current node model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 19-24.

收稿日期: 2014-12-05; 修回日期: 2015-04-22

作者简介:

江明颖(1976-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统电压稳定分析与控制; E-mail: 763189873@qq.com

鲁宝春(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统电压稳定分析与控制;

姜丕杰(1978-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 周金梅)