

基于补偿算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯潮流计算方法

艾鹏, 张雪霞, 王晓茹

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 隐式 Z_{bus} 高斯法由于其高效、可靠的特点广泛应用于放射状和弱环状的配电网潮流计算。该方法适合处理 PQ 节点和 P-Q(V)节点, 但是当系统中并入 PV 节点类型的分布式电源时, 它存在潮流发散的问题。为了解决这类问题, 提出一种基于补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法。其核心思路是在每一次迭代后, 通过节点阻抗矩阵和电压不匹配量对 PV 节点的无功功率进行修正, 从而使 PV 节点的注入无功功率达到真实值, 进而求得潮流收敛的解。该方法被应用到 IEEE 33 节点配电系统中, 通过与基于同伦算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯潮流计算方法进行比较, 表明提出的方法收敛性更好, 收敛速度更快。此外, PV 节点的数量对该方法的收敛性和收敛速度影响不大, 表明该方法更适合于含 PV 节点类型配电网潮流计算。

关键词: 隐式 Z_{bus} 高斯法; 同伦算法; 补偿法; PV 节点; 配电网潮流

An enhanced implicit Z_{bus} Gauss method based on compensation method for power flow calculation

AI Peng, ZHANG Xuexia, WANG Xiaoru

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The implicit Z_{bus} Gauss method is widely used in distribution network power flow calculation for radial and weakly meshed networks because of its efficiency and reliability. This method is appropriate for handling PQ or PQ(V) nodes in power flow calculation but it encounters divergence problems when distributed generations (DGs) modeled as PV nodes are incorporated in the system. In order to solve the problem, this paper proposes an enhanced implicit Z_{bus} Gauss method on the basis of compensation method. The main idea of which is the reactive power of PV nodes is revised through node-impedance-matrix and deviation of voltage amplitude after each iteration, so that the real value of reactive power of PV nodes can be obtained and the convergent ones of power flow solutions can further be achieved. This method is applied to IEEE-33 bus distribution system. Compared with the homotopy-enhanced implicit Z_{bus} Gauss method, it demonstrates that the proposed method has better convergence and faster convergent speed. In addition, the number of PV nodes exert little influence on convergence and convergent speed of this method, which manifests the proposed method is more suitable for power flow calculation with DG modeled as PV nodes.

Key words: implicit Z_{bus} Gauss method; homotopy method; compensation method; PV nodes; distribution power flow

中图分类号: TM74

文章编号: 1674-3415(2015)21-0067-06

0 引言

智能电网的不断发展使各种分布式电源(DG)接入配电网, 主要包括风力发电、光伏发电、燃料电池、微型燃气轮机等新型能源。大量DG的并网对配电网潮流分析产生了很大的影响^[1-4], 传统的配电网潮流算法由于未考虑各种形式的DG并网而不再适用, 因此, 含分布式电源的配电网潮流计算方法成为研究热点问题^[5-9]。

配电网潮流计算方法主要可以分为四类: 前推

回代法^[10-12]、改进牛顿法^[13]、隐式 Z_{bus} 高斯法^[14]和回路分析法^[6]。

隐式 Z_{bus} 高斯法以节点电压方程为基础进行迭代运算, 潮流计算中的节点注入电流通常由节点注入功率除以节点电压得到。对于系统中的PQ节点, 可以直接计算得到节点注入电流。但是对于系统中的PV节点, 由于节点注入无功功率未知, 无法直接求得节点注入电流, 这就给隐式 Z_{bus} 高斯法的应用带来了困难。传统隐式 Z_{bus} 高斯法对于PV节点的处理方法存在不足, 影响该算法的收敛性。

针对传统隐式 Z_{bus} 高斯法对于PV节点的处理方法存在潮流不收敛的问题,学者们提出了一些改进方法。如文献[15]提出了一种三相高斯潮流算法——隐式节点阻抗矩阵法。在对称分量坐标系下建立了系统的节点电压方程,得到三相隐式节点阻抗矩阵法的迭代方程。由于PV节点的无功功率未知,在潮流计算时,隐式节点阻抗矩阵法根据节点电压初值计算PV节点的注入无功功率,然后求解PV节点的注入电流并将其代入潮流方程,计算得到各节点迭代电压后,根据PV节点给定电压幅值修正计算得到的PV节点电压迭代值,隐式节点阻抗矩阵法对PV节点的处理方法会影响到该算法的收敛性。

文献[16]提出了快速三相高斯潮流算法,它利用PV节点、平衡节点和发电机内阻的关系,增加发电机的内电势节点,使高斯算法的方程的未知数等于方程的个数,然后消去PQ节点对应的节点导纳中元素,建立只有PV节点类型的网络,通过对该网络进行潮流计算,求得PV节点的解,将PV电压代入PQ方程进行回代,得到一次迭代的解。

文献[17]针对传统隐式 Z_{bus} 高斯法处理PV节点存在潮流收敛困难的问题,提出了一种基于同伦算法的改进隐式 Z_{bus} 高斯法,该方法利用同伦算法构造参数化的潮流方程式,然后通过连续性方法,从PV节点被看作PQ节点的潮流解出发,逐渐逼近PV节点的潮流解,具有全局收敛的特性,但是该算法随着PV节点数量的增加,收敛速度受到影响。本文算法就是和该算法进行比较。

如何构造PV节点的处理方法,仍然是隐式 Z_{bus} 高斯潮流算法的难点。本文提出了补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法,该方法被应用到IEEE 33节点配电系统中,并且与文献[17]提出的基于同伦算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯潮流计算方法进行比较。

分布式电源根据不同的接口类型和控制方式,可以划分为PQ节点、PV节点、PI节点和P-Q(V)节点,即分布式电源的控制方式在潮流分析中只影响它的节点类型,而对潮流计算不产生影响,只要节点类型确定,在潮流计算中便不受控制方式的影响,即本文潮流算法不受到分布式电源控制方式的影响。传统隐式 Z_{bus} 高斯法可以很好地处理PQ节点、PI节点和P-Q(V)节点,但是在处理PV节点类型时存在潮流发散的问题,本文重点对隐式 Z_{bus} 高斯法如何处理PV节点类型展开研究^[8,13,17]。

1 隐式 Z_{bus} 高斯法^[18]

一般配电网的潮流方程为

$$I = Y_{bus}V \quad (1)$$

式中:矩阵 V 是节点电压;矩阵 I 是节点注入电流; Y_{bus} 是配电网的节点导纳矩阵。将配电系统的源节点和其他节点分离,则可将系统方程写为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: I_1 、 V_1 为源节点的电流、电压向量; I_2 、 V_2 为除源节点外其余节点的电流、电压向量。

如果系统中没有恒功率模型, I_2 是已知的恒定注入电流,那么 V_2 可以直接根据式(3)求得。

$$V_2 = Y_{22}^{-1}(I_2 - Y_{21}V_1) \quad (3)$$

这是利用节点法直接求解线性方程的解,如果系统中有恒功率负荷,则

$$V_2 = Y_{22}^{-1}(I_2(V_2) - Y_{21}V_1) \quad (4)$$

该隐式 Z_{bus} 高斯法通过式(4)反复更新求解 V_2 。当迭代过程中 V_2 的变化值比规定的误差值小时,就得到了方程的解。

隐式 Z_{bus} 高斯法的求解步骤可以总结如下:

(1) 输入原始数据,并初始化各节点电压;

(2) 建立系统的节点导纳矩阵 Y ,如果系统含有恒定阻抗负荷或并联电容器,则将导纳矩阵加入到节点导纳矩阵中;

(3) 将系统的平衡节点(一般为源点)和其余类型的节点(一般为负荷节点)进行分离,得到不包含平衡节点的 $(n-1)$ 阶矩阵 Y_{22} 。

(4) 对矩阵 Y_{22} 进行矩阵LU分解,其中 $(Y_{22}=LU)$ 。

(5) 利用功率方程式 $I_i^n = (\frac{S_i^n}{V_i^n})^*$ 和节点当前电压

值(第一次迭代时取初始值)求出除平衡节点以外的其余节点的电流注入量 I_2 。

(6) 通过等式 $Ly = I_2(V_2) - Y_{21}V_1$ 向前迭代来求解 y 。

(7) 通过等式 $UV_2 = y$ 向后迭代来求解 V_2 。

(8) 计算同一节点前后两次迭代所得的电压差,将其与系统规定的收敛精度进行对比,如果小于收敛精度,则迭代结束。如果大于收敛精度,转入第(5)步。

当配电网中只有一个平衡节点,其余节点均为PQ节点时,隐式 Z_{bus} 高斯法具有良好的收敛性和有效性^[17]。但是当配电网中并入PV节点类型的DG时,该方法可能会遇到潮流不收敛的问题,严重制约了隐式 Z_{bus} 高斯法在潮流计算中的应用。

2 基于补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法

在配电网系统潮流计算中,为了解决传统

隐式 Z_{bus} 高斯法在求解 PV 节点时存在潮流发散的问题, 本文提出一种基于补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法。

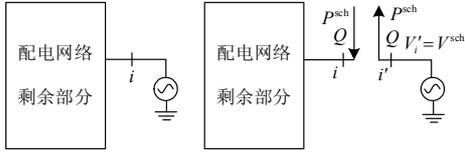


图 1 PV 节点形成断点前后电路图

Fig. 1 Circuits before and after PV bus forming breakpoint

如图 1 所示, 将 PV 节点从配电网中断开, 使系统形成一个虚拟节点 i' , 该虚拟节点的电压幅值和注入有功功率等于 PV 节点给定值, 为了使断点 i 和虚拟节点 i' 的电压相等, 不断改变注入无功功率 Q 。

若配电网有 n 个 PV 节点, 如图 2 所示, 从断点端口处看进去的戴维南等效电路满足^[19]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z} \times \mathbf{I} \quad (5)$$

其中: \mathbf{Z} ^[19-20] 为 PV 节点的节点阻抗矩阵; \mathbf{V} 是断点处的电压向量; \mathbf{I} 是断点处的注入电流向量。由于配电网是线性网络, 电压和注入电流的增量也满足式(5), 即

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{Z} \times \Delta \mathbf{I} \quad (6)$$

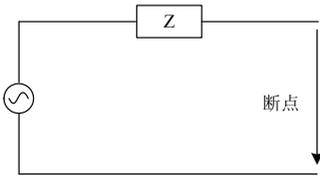


图 2 PV 节点断点处的戴维南等效电路

Fig. 2 Thevenin equivalent circuit of the network as seen from the PV node breakpoint ports

又因电流注入增量与功率注入增量满足关系式:

$$\mathbf{V} \times \Delta \mathbf{I}^* = \Delta \mathbf{S} \quad (7)$$

因为配电网电压幅值接近 1.0 p.u. 并且配电网电压相角很小, 因此式(7)可以简化为

$$\Delta \mathbf{I} \approx \Delta \mathbf{S}^* \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 得

$$\Delta \mathbf{V} \approx \mathbf{Z} \times \Delta \mathbf{S}^* \quad (9)$$

将式(9)表示成直角坐标形式

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\mathbf{X} \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{S}^* = \Delta \mathbf{P} - j\Delta \mathbf{Q} \quad (11)$$

$$\Delta \mathbf{V} = \Delta \mathbf{u} + j\Delta \boldsymbol{\delta} \quad (12)$$

其中: $\Delta \mathbf{u} = \text{RE}(V_k^{\text{sch}} \cdot e^{j\theta_k^{(m)}} - u_k^{(m)} \cdot e^{j\theta_k^{(m)}})$; $\theta_k^{(m)}$ 为第 m 次迭代时 $V_k^{(m)}$ 的相角; V_k^{sch} 为 PV 节点恒定电压幅值; $u_k^{(m)}$ 为第 m 次迭代时 $V_k^{(m)}$ 的电压幅值。

则式(9)可以表示成^[19]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{R} \\ -\mathbf{R} & \mathbf{X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{Q} \\ \Delta \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \boldsymbol{\delta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于 PV 节点的有功功率变化量 $\Delta \mathbf{P} = 0$, 因此式(13)满足^[19]

$$\mathbf{X} \times \Delta \mathbf{Q} = \Delta \mathbf{u} \quad (14)$$

其中: \mathbf{X} 为 PV 节点的节点电抗矩阵; $\Delta \mathbf{Q}$ 为 PV 节点的无功功率补偿量。

在第 $m+1$ 次迭代时, 第 PV 节点输出总的无功功率为

$$\mathbf{Q}^{m+1} = \mathbf{Q}^m + \Delta \mathbf{Q}^m \quad (15)$$

将补偿法应用于隐式 Z_{bus} 高斯法的基本步骤如下。

(1) 初始化各节点电压, 计算系统 PV 节点的节点阻抗矩阵。

(2) PV 节点用当前整个系统的初始电压值计算其注入无功功率, 然后将 PV 节点视作 PQ 节点。

(3) 用传统隐式 Z_{bus} 高斯法对 PV 节点视作 PQ 节点的系统进行一次潮流计算。

(4) 用式(14)计算各 PV 节点的无功功率补偿量 $\Delta \mathbf{Q}$, 更新各 PV 节点的注入无功功率。

(5) 判断是否收敛, 收敛条件有两个要求: ①各节点迭代前后两次电压差小于一定误差。②求得的 PV 节点的幅值与 PV 节点给定值小于一定误差。如果潮流计算结果不满足收敛条件, 则进入第(3)步, 继续进行迭代。否则, 进入第(6)步。

(6) 输出潮流计算结果。

如果在潮流计算过程中, PV 节点注入的无功功率值越限, 则自动将其转换为 PQ 节点, Q 为该节点无功功率的上限或者下限。

3 算例分析

为了验证所提出算法的有效性和可靠性, 利用 Matlab 软件实现了该算法, 对 IEEE 33 节点配电系统进行了仿真, 其配网系统具体参数见文献[18], 并且对基于同伦算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法进行了仿真研究, 对两种改进方法的潮流计算结果和收敛性等各个方面进行了分析。

配电系统拓扑结构如图 3 所示, 其中, 节点 1 为平衡节点, 其余节点均为 PQ 节点。

本文改进方法的收敛条件为: 各节点前后两次电压幅值误差小于 10^{-6} , PV 节点电压幅值与指定值小于 10^{-6} 。

为了对比本文所提出的基于补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法与传统隐式 Z_{bus} 高斯法处理 PV 节点的收敛性, 以含 3 个 PV 节点的配电系统为例, 分别作出

电压误差与迭代次数的关系图像，如图 4 所示。

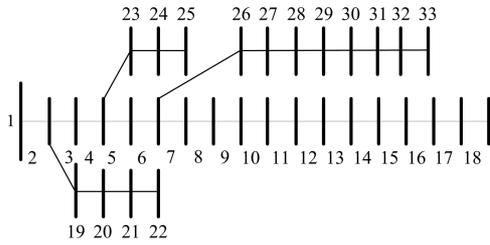


图 3 IEEE 33 节点配电系统

Fig. 3 IEEE 33 bus distribution power system

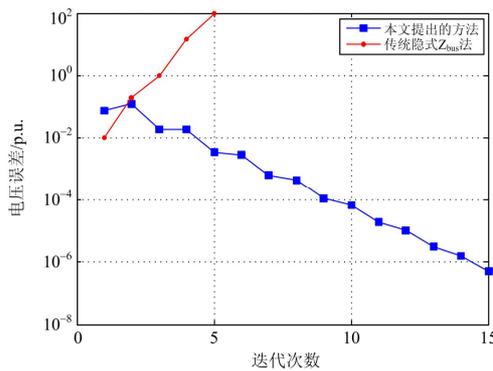


图 4 本文所提方法与传统隐式 Z_{bus} 高斯法收敛性的对比
Fig. 4 Comparison of the convergence between the proposed method and the implicit Z_{bus} Gauss method

由图 4 可知，当 IEEE 33 节点配电系统的节点 2、节点 3 和节点 15 分别并入有功功率为 100 kW，电压幅值为 1 p.u. 的 PV 类型的分布式电源时，传统的隐式 Z_{bus} 高斯法出现了发散的问题，而本文提出的基于补偿算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法经过 15 次迭代以后达到收敛，证明本文提出的算法能有效地解决传统隐式 Z_{bus} 高斯法对 PV 节点潮流不收敛的问题。

依次在 IEEE 33 节点配电系统中并入 1-6 个 PV 节点，其中 PV 节点的有功功率均取为 100 kW，电压幅值均为 1 p.u.，本文所提出的基于补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法与传统隐式 Z_{bus} 高斯法处理 PV 节点的收敛情况如表 1 所示。

表 1 传统隐式 Z_{bus} 高斯法与本文方法收敛性对比

Table1 Convergence comparison between the traditional implicit Z_{bus} Gauss method and the proposed method

PV 节点数量	PV 节点	迭代次数	
		本文算法	传统算法
1	3	17	不收敛
2	3、22	15	不收敛
3	2、3、6	15	不收敛
4	2、3、6、10	13	不收敛
5	2、3、6、10、14	13	不收敛
6	2、3、6、10、14、19	13	不收敛

由表 1 可知：当 IEEE33 节点配电系统中依次并入 1-6 个 PV 节点时，传统隐式 Z_{bus} 高斯法均不收敛。而本文提出的基于补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法都能可靠收敛，随着 PV 节点数量的增多，它的迭代次数基本不变，证明本文提出的方法能有效地解决传统隐式 Z_{bus} 高斯法处理 PV 节点不收敛的问题，并且它具有可靠的收敛性。

本文对分别含 1-6 个 PV 节点的 IEEE 33 节点配电系统，用文献[17]提出的基于同伦算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法，利用 Matlab 软件编写了潮流计算程序，然后与本文提出的算法进行比较。

基于同伦算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法中，分别含 1-6 个 PV 节点的 33 母线配电系统，第二阶段中 PV-PQ 模型中被看作 PQ 节点的 PV 节点的无功功率均为 50 kW，第三阶段中，当含 1 个 PV 节点时步长 $\Delta\lambda$ 取为 0.001；当含 2-6 个 PV 节点时 $\Delta\lambda$ 均取为 0.0001。

首先比较本文提出改进方法与同伦改进方法的收敛性，同伦改进方法是经过数次收敛潮流的解逐渐逼近满足要求潮流方程的解，由于它的每一个收敛解都有迭代次数，因此无法用迭代次数对两种方法进行对比。

本文对两种算法都达到各自收敛条件所需的时间进行对比。

文献[17]提出的基于同伦算法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法的收敛条件如下。

- 1) 含 P-Q 节点潮流方程中各节点前后两次电压幅值误差小于 10^{-7} ；
- 2) 第三阶段同伦进程中各 PV 节点的收敛精度为 10^{-4} 。

本文改进方法的收敛条件为：各节点前后两次电压幅值误差小于 10^{-6} ，PV 节点电压幅值与指定值小于 10^{-6} 。

当 IEEE 33 节点配电系统分别含 1-6 个 PV 节点时，本文改进方法和同伦改进方法达到各自收敛条件时，由表 2 可知：PV 节点的数量对本文改进方法的收敛速度影响较小，本文改进方法在 6 种情况下均可以快速收敛。而同伦改进方法所需的收敛时间随着 PV 节点数量的增多而增加，并且收敛时间远远大于本文改进方法，表明本文的改进方法收敛速度比同伦改进方法快。

IEEE 33 节点配电系统分别含 1-6 个 PV 节点时，将本文改进方法和同伦改进方法最终求得的 PV 节点的电压进行比较，如表 3 所示。

由表 3 可以看出：当 33 母线配电系统分别含 1-6 个 PV 节点时，本文提出的改进方法 PV 节点的电压幅值均可以达到 10^{-6} 的精度，并且本算法需要

表 2 同伦改进方法与本文方法收敛时间对比
Table 2 Comparison in convergence time between the homotopy-enhanced Implicit Z-bus Gauss method and the proposed method

PV 节点数量	PV 节点	本文算法	文献[17]算法
1	15	0.0942 s	0.4717 s
2	3、15	0.1219 s	2.8464 s
3	2、3、15	0.1291 s	3.2569 s
4	2、3、6、10	0.1321 s	3.7910 s
5	2、3、6、10、15	0.1426 s	5.3796 s
6	2、3、6、10、15、19	0.1490 s	6.5107 s

表 3 同伦改进方法与本文改进方法 PV 节点电压比较
Table 3 Comparison of PV nodes voltages between the homotopy-enhanced Implicit Z-bus Gauss method and the proposed method

节点数量	节点号	本文算法		文献[17]算法	
		电压幅值	相角	电压幅值	相角
1	15	1.000 00	-5.8230	0.999 99	-5.9267
	3	1.000 00	-1.6503	0.999 99	-1.6566
2	15	1.000 00	-6.0508	0.999 90	-6.0657
	2	1.000 00	-0.2837	1.000 00	-0.2844
3	3	1.000 00	-1.6486	0.999 90	-1.6369
	15	1.000 00	-6.0491	1.000 0	-6.0472
4	2	1.000 00	-0.2703	0.999 98	-0.2686
	3	1.000 00	-1.5676	0.999 90	-1.5565
	6	1.000 00	-3.8213	1.000 01	-3.8207
5	15	1.000 00	-5.7536	0.999 99	-5.7513
	2	1.000 00	-0.2537	0.999 98	-0.2520
	3	1.000 00	-1.4664	0.999 90	-1.4552
6	6	1.000 00	-3.5095	1.000 01	-3.5088
	10	1.000 00	-4.4957	0.999 99	-4.4932
	15	1.000 00	-5.0753	0.999 99	-5.0731
6	2	1.000 00	-0.2381	1.000 01	-0.2397
	3	1.000 00	-1.4508	0.999 90	-1.4394
	6	1.000 00	-3.4939	1.000 01	-3.4927
	10	1.000 00	-4.4801	0.999 99	-4.4774
6	15	1.000 00	-5.0597	1.000 00	-5.0573
	19	1.000 00	-0.2582	1.000 00	-0.2613

的收敛时间很短。而文献[17]提出的算法 PV 节点在达到 10^{-4} 的收敛精度时已经需要很长的收敛时间, 证明本文提出算法的收敛性能更好。

4 结论

隐式 Z_{bus} 高斯法适合求解 PQ 和 PQ(V) 节点,

然而当求解 PV 节点类型时, 它存在潮流发散的问题。本文提出基于补偿法改进的隐式 Z_{bus} 高斯法, IEEE 33 节点配电系统测试算例显示: 1) 与传统隐式 Z_{bus} 高斯法进行对比, 表明本文所提出的方法能有效地求解含 PV 类型分布式电源配电系统的潮流计算; 2) 随着 PV 节点数量的增加, 本文提出方法的迭代次数基本不受影响, 表明该方法具有可靠的收敛性; 3) 与基于同伦改进的隐式 Z_{bus} 高斯法进行对比, 表明本文提出方法的收敛速度更快。

参考文献

- [1] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
LI Tiyin, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [2] 张勇军, 翟伟芳, 林建熙. 分布式发电并网的网损影响评价指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 134-137.
ZHANG Yongjun, ZHAI Weifang, LIN Jianxi. Study on power loss evaluation index of the DG's accessing to the networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 134-137.
- [3] 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 on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [4] 王成山, 王守相. 分布式发电功能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [5] 牛焕娜, 井天军, 李汉成, 等. 基于回路分析的含分布式电源配电网简化潮流计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1033-1038.
NIU Huanna, JING Tianjun, LI Hancheng, et al. Simplified power flow calculation for distribution network with distributed generation based on loop analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1033-1038.
- [6] 李红伟, 张安安. 含 PV 型分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 128-135.

- LI Hongwei, ZHANG Anan. Three phase power flow solution for weakly meshed distribution system including PV type distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 128-135.
- [7] 吕学勤, 吴辰宁. 含分布式电源的配电网潮流计算改进方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 48-51.
- LÜ Xueqin, WU Chenning. Modified power flow calculation method of distribution grid with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 48-51.
- [8] JU Yuntao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An extension of FBS three-phase power flow for handling PV nodes in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1547-1555.
- [9] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 822-827.
- [10] 闫丽梅, 谢明霞, 徐建军, 等. 含分布式电源的配电网潮流改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 17-22.
- YAN Limei, XIE Mingxia, XU Jianjun, et al. Improved power flow calculation of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 17-22.
- [11] 杨辉, 文福栓, 刘永强, 等. 适用于配电系统潮流计算的新的前推回代法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(3): 123-128.
- YANG Hui, WEN Fushuan, LIU Yongqiang, et al. New back/forward sweep method for load flow computation in distribution systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2010, 22(3): 123-128.
- [12] 丁明, 郭学凤. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 35-40.
- DING Ming, GUO Xuefeng. Three phase power for the weakly meshed distribution network with the distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 35-40.
- [13] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 11-15.
- WANG Shouxiang, HUANG Lijuan, WANG Chengshan, et al. Unbalanced three phase power flow calculation for distributed power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 11-15.
- [14] CHEN T H, CHEN M S, HWANG K J, et al. Distribution system power flow analysis-a rigid approach [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [15] ZHANG X P, CHEN H. Asymmetrical three-phase load flow study based on symmetrical component theory[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 1994, 141(3): 248-252.
- [16] 彭谦, 姜彤, 杨以涵, 等. 快速三相高斯潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 48-52.
- PENG Qian, JIANG Tong, YANG Yihan, et al. Fast three-phase Gauss load flow algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 48-52.
- [17] CHIANG H D, ZHAO Tianqi, DENG Jiaojiao, et al. Homotopy-enhanced power flow methods for general distribution networks with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 93-100.
- [18] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [19] LUO G X, SEMLYEN A. Efficient load flow for large weakly meshed networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1309-1316.
- [20] CHENG C S, SHLRMOHAMMADI D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 10(2): 671-679.

收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-04-08

作者简介:

艾鹏(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与建模仿真; E-mail: aipengswjtu@163.com

张雪霞(1979-), 女, 通信作者, 博士, 研究方向为燃料电池并网技术、燃料电池混合动力机车技术、计算智能及其在电力系统中的应用研究、微电网优化调度; E-mail: survival_zxx@sina.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护和安全稳定控制、配电网与变电站自动化技术。

(编辑 姜新丽)