

含大规模热泵的配电网异步迭代分布式三相潮流计算

巨云涛¹, 杨烁², 赵乐², 成岭³, 叶林¹

(1. 中国农业大学, 北京 100083; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100075;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 随着分散式热泵大规模推广应用, 考虑热泵模型的三相潮流计算是分析配电网电压水平的重要工具。由于不同投资主体的增量配电网快速发展, 考虑到保护数据隐私、通信延迟等因素, 实现集中式潮流计算和同步迭代的分布式潮流计算都很困难。首先给出基于隐阻抗法的含大规模热泵的三相潮流计算方法, 然后给出基于矩阵分裂模式的异步迭代分布式计算模式, 实现适用于配电网的分布式潮流计算方法。通过 IEEE 123 节点系统验证了算法的有效性。

关键词: 潮流计算; 分布式计算; 异步迭代; 电采暖; 三相不平衡

Distributed three-phase load flow accommodated large scale heat pumps based on asynchronous iteration scheme

JU Yuntao¹, YANG Shuo², ZHAO Le², CHENG Ling³, YE Lin¹

(1. China Agriculture University, Beijing 100083, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With deployment of large scale distributed heat pumps, three-phase load flow considering heat pumps impact is a basic tool to analyze distribution network profile. Due to the rapid development of incremental distribution networks with different investment entities, it is very difficult to achieve both centralized power flow calculation and synchronous power flow calculation considering the factors such as data privacy protection and communication delay. Firstly, three-phase load flow with large scale heat pumps is proposed based on implicit node impedance method. Secondly, asynchronous iterated load flow is proposed based on matrix-split scheme. The proposed method is suitable for distribution network distributed load flow. Finally, the proposed method is validated with IEEE 123 test feeder.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707196) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Simulation Analysis of the Influence of the Electric Heating System on the Power Grid under the Thermoelectric Coupling”.

Key words: load flow; distributed algorithm; asynchronous iteration; electric heating device; three-phase unbalance

0 引言

大力推动电采暖等电能替代设备, 主要可带来两方面社会效益: 一方面, 目前我国风电弃风弃光严重, 发展电采暖可缓解新能源电能的严重浪费问题^[1]; 另一方面, 我国雾霾严重, 清洁供热的电采暖能够有效缓解北方严重的空气质量问题^[2]。由于大规模电采暖设备接入传统规划的配电网, 靠近负荷端电网的低电压问题十分严重, 导致启动失败问

题时有发生。为对网络电压水平进行可靠评估, 含大规模电采暖设备的配电网三相潮流计算是一项重要的基础工作。由于配电网节点数众多^[3], 随着不同投资主体的增量配电网发展, 考虑到数据隐私、通信延迟等因素, 实现集中潮流计算困难, 所以有必要研究分布式的配电网潮流计算方法。

由于分布式能源的渗透, 三相不平衡的配电网潮流计算需要考虑各种接入设备的三相不平衡模型^[4-5]。配电网潮流计算方法主要分为不动点迭代和牛顿法两类^[6-10], 其中不动点迭代方法应用最为广泛, 具体形式包括: 改进节点法^[8]、回路分析法^[10]、前推回代法^[6]和隐阻抗法^[7]等。分布式潮流计算是

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707196); 国家电网公司科技项目“热电耦合下的电采暖系统对电网影响仿真分析”

采用多代理分布式智能管理配电网的基本功能^[11]。目前电力系统分布式潮流计算的方法主要基于牛顿法, 包括基于矩阵迭代法^[12]的 Jacobian-Free 牛顿算法、同步迭代的主从分裂法^[13]、有协调层基于等值参数的异步迭代算法^[14-15]。然而, 适用于三相配电网的不动点迭代类分布式计算方法尚未得到深入研究。随着电采暖设备渗透, 驱动压缩机的电动机作为重要负载广泛存在于配电网, 为了计算更加准确的准稳态配电网三相潮流, 需要在潮流计算中考虑电动机模型。同时, 该模型也可用于配电网的电磁暂态仿真程序初始化^[16]。

本文首先给出一种隐阻抗法与局部节点牛顿法的配电网混合三相潮流计算方法。所提方法可有效处理非线性的感应电动机节点, 然后基于矩阵分裂模式, 给出隐阻抗法的异步迭代分布式计算模式, 并对小阻抗支路对算法收敛性的影响进行分析, 给出浮空节点的处理方法, 最后通过三相不平衡 IEEE 123 标准算例验证算法的有效性。

1 三相感应电机模型

由于感应电机通常采用三角形或星型接地的接法, 通常不考虑零序网络^[17]。感应电机每相的序等值电路如图 1 所示, 图中各符号定义为: R_s 表示定子电阻, X_s 表示定子电抗, X_r 表示折合到定子侧的转子电抗, R_r 表示折合到定子侧的转子电抗, R_L 表示负载电阻(正序和负序电阻取值不同), X_m 表示励磁电抗。

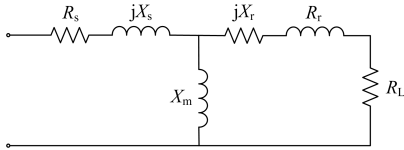


图 1 感应电机序等值电路图

Fig. 1 Sequence equivalent circuit of induction motor

定义正序滑差为 s , 根据负序转子参考坐标系反向旋转的原理, 负序滑差可表示为 $2-s$ 。感应电机正序负载电阻可表示为

$$R_{L,1} = \frac{1-s}{s} R_r \quad (1)$$

式中, 下标 1 表示正序。

负序负载电阻由式(1)中 s 替换成 $2-s$ 得到。

$$R_{L,2} = \frac{1-(2-s)}{2-s} R_r = \frac{s-1}{2-s} R_r \quad (2)$$

式中, 下标 2 表示负序。

根据图 1 所示的等值电路, 感应电机正序阻抗

可表示为

$$Z_{m,1} = R_s + jX_s + \frac{jX_m (R_r + R_{L,1} + jX_r)}{R_r + R_{L,1} + j(X_m + X_r)} \quad (3)$$

感应电机负序阻抗可表示为

$$Z_{m,2} = R_s + jX_s + \frac{jX_m (R_r + R_{L,2} + jX_r)}{R_r + R_{L,2} + j(X_m + X_r)} \quad (4)$$

当正序滑差为已知量时, 感应电动机等值为阻抗模型, 在潮流计算中处理方便。而实际上, 感应电机准稳态潮流计算中通常给定功率或力矩, 正序滑差需要迭代计算。当电功率 P_m 为已知量时, 感应电机有功约束方程为

$$P_m = \text{Re} \left[3(V_1 I_1^* + V_2 I_2^*) \right] \quad (5)$$

式中: 上标*表示复数的共轭; V_1 、 V_2 表示正序和负序并网接口电压; I_1 、 I_2 表示正序和负序并网接口注入感应电机的电流。

正序电压和正序电流满足约束:

$$V_1 = Z_{m,1} \cdot I_1 \quad (6)$$

负序电压和负序电流满足约束:

$$V_2 = Z_{m,2} \cdot I_2 \quad (7)$$

在不动点迭代潮流计算中, 三相感应电机首先假定并网电压已知, 然后迭代求解注入电流。本文采用牛顿法计算感应电机非线性模型。根据正序、负序等效电路以及功率平衡约束, 等式方程包括

$$\begin{cases} f_1 = V_1 - Z_{m,1} \cdot I_1 = 0 \\ f_2 = V_2 - Z_{m,2} \cdot I_2 = 0 \\ f_3 = P_m - \text{Re} \left[3(V_1 I_1^* + V_2 I_2^*) \right] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

未知量包括 I_1 、 I_2 和正序滑差 s 等, 所以模型可解, 雅克比矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_{1,\text{re}}}{\partial I_{1,\text{re}}} & \frac{\partial f_{1,\text{re}}}{\partial I_{1,\text{im}}} & \frac{\partial f_{1,\text{re}}}{\partial I_{2,\text{re}}} & \frac{\partial f_{1,\text{re}}}{\partial I_{2,\text{im}}} & \frac{\partial f_{1,\text{re}}}{\partial s} \\ \frac{\partial f_{1,\text{im}}}{\partial I_{1,\text{re}}} & \frac{\partial f_{1,\text{im}}}{\partial I_{1,\text{im}}} & \frac{\partial f_{1,\text{im}}}{\partial I_{2,\text{re}}} & \frac{\partial f_{1,\text{im}}}{\partial I_{2,\text{im}}} & \frac{\partial f_{1,\text{im}}}{\partial s} \\ \frac{\partial f_{2,\text{re}}}{\partial I_{1,\text{re}}} & \frac{\partial f_{2,\text{re}}}{\partial I_{1,\text{im}}} & \frac{\partial f_{2,\text{re}}}{\partial I_{2,\text{re}}} & \frac{\partial f_{2,\text{re}}}{\partial I_{2,\text{im}}} & \frac{\partial f_{2,\text{re}}}{\partial s} \\ \frac{\partial f_{2,\text{im}}}{\partial I_{1,\text{re}}} & \frac{\partial f_{2,\text{im}}}{\partial I_{1,\text{im}}} & \frac{\partial f_{2,\text{im}}}{\partial I_{2,\text{re}}} & \frac{\partial f_{2,\text{im}}}{\partial I_{2,\text{im}}} & \frac{\partial f_{2,\text{im}}}{\partial s} \\ \frac{\partial f_3}{\partial I_{1,\text{re}}} & \frac{\partial f_3}{\partial I_{1,\text{im}}} & \frac{\partial f_3}{\partial I_{2,\text{re}}} & \frac{\partial f_3}{\partial I_{2,\text{im}}} & \frac{\partial f_3}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: 下标 re 表示实部; 下标 im 表示虚部; $I_{1,\text{re}}$ 、 $I_{1,\text{im}}$ 、 $I_{2,\text{re}}$ 、 $I_{2,\text{im}}$ 分别表示 I_1 和 I_2 的实部和虚部。

2 含感应电机的隐阻抗法三相潮流计算

假设配电网电压源用下标 sr 表示, 非电压源节点电压用下标 n 表示。这里需要强调的是, 当电网中存在由三角形接法存在的浮空点时, 则固定三角形接法中某一个节点为电压源。

完全节点导纳矩阵表示为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{sr, sr} & Y_{sr, n} \\ Y_{n, sr} & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

基于节点导纳矩阵的网络约束可表示为

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{Y}_{nn}^{-1} (\mathbf{I}_n - \mathbf{Y}_{n, sr} \mathbf{V}_{sr}) \quad (11)$$

本文采用的潮流计算方法是一种相序耦合的计算方法^[19-21], 其中网络部分是采用相模型, 感应电机对应的是节点功率部分, 该部分采用的是序分量模型。相序模型之间通过相序转换公式进行相序电压和相序电流的转换。具体来说, 配电网隐阻抗法三相潮流计算方法原理如下。

(1) 首先取节点注入电流 $\mathbf{I}_n^{(k)}$ ($k=0$, 初值可取 0);

根据式(11), 计算得到节点电压 $\mathbf{V}_n^{(k)}$ 。

(2) 然后根据节点约束, 计算新的节点电流, 这里节点约束包括恒阻抗、恒电流、恒功率等负荷模型, 也包括基于牛顿法求解的感应电机三相电流, 文章第 2 部分介绍了感应电机正序和负序电流的计算方法, 然后结合零序电流为 0, 依据式(12)相序转换关系得到三相电流。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{I}_{abc} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}_{012}$$

式中: $\mathbf{I}_{abc}$ 表示三相电流; $\mathbf{I}_{012}$ 表示三序电流; $\mathbf{S}$ 表示相序转换矩阵, $\alpha = e^{j120^\circ}$; 对于不动点迭代类算法, 因为负序阻抗过小会引发潮流发散, 在计算过程中需要采用补偿法^[18]克服这一问题。

(3) 回到(1)重新计算节点电压, 相邻两次迭代节点电压差的最大幅值小于收敛阈值, 则停止潮流计算, 否则回到(2)继续计算。

3 含感应电机的隐阻抗法异步迭代分布式潮流计算

定义矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{nn} & -\mathbf{B}_{nn} \\ \mathbf{B}_{nn} & \mathbf{G}_{nn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \text{Re}[(\mathbf{I}_n - \mathbf{Y}_{n, sr} \mathbf{V}_{sr})] \\ \text{Im}[(\mathbf{I}_n - \mathbf{Y}_{n, sr} \mathbf{V}_{sr})] \end{bmatrix},$$

式(11)可写成:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (13)$$

$$\text{其中, } \mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{V}_n) \\ \text{Im}(\mathbf{V}_n) \end{bmatrix}。$$

矩阵可分解为 $\mathbf{A} = \mathbf{M} - \mathbf{N}$, 其中 $\mathbf{M}$ 可逆, 则式(13)可以表示为

$$\mathbf{x}_n^{(k+1)} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{N} \mathbf{x}_n^{(k)} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{b} \quad (14)$$

本文中采用的矩阵 $\mathbf{M}$ 分裂的构造方式为^[22]

$$\mathbf{M} = \mathbf{D} + \beta \bar{\mathbf{E}} \quad (15)$$

$$\mathbf{N} = \beta \bar{\mathbf{E}} - \mathbf{E} \quad (16)$$

矩阵 $\mathbf{D}$ 的元素定义为

$$\mathbf{D}_{ij} = \begin{cases} A_{ij} & \text{如果节点 } i \text{ 和 } j \text{ 属于同一分区 (包括 } i=j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

矩阵 $\mathbf{E}$ 的元素定义为

$$\mathbf{E}_{ij} = \begin{cases} A_{ij} & \text{如果节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 属于不同分区} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

矩阵 $\bar{\mathbf{E}}$ 是为了保证收敛性的对角矩阵, 矩阵元素定义为

$$\bar{E}_{ii} = \sum_{j \neq i} |A_{ij}| \quad (19)$$

β 是调节因子, 用来调节收敛性, 由于导纳矩阵对角占优, β 可取 0。

假设配电网有 t 个分区, 整体潮流计算公式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{n,1}^{(k+1)} \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{n,t}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1^{-1} & & \\ & \cdots & \\ & & \mathbf{M}_t^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \cdots & \mathbf{N}_{1t} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{N}_{t1} & \cdots & \mathbf{N}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{n,1}^{(k)} \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{n,t}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1^{-1} & & \\ & \cdots & \\ & & \mathbf{M}_t^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_t \end{bmatrix} \quad (20)$$

异步迭代时, 式(20)右手边 $\mathbf{V}_{n,1}^{(k)} \cdots \mathbf{V}_{n,t}^{(k)}$ 不一定属于同一次迭代序列。每个分区独立进行迭代计算, 对于第 J 个分区有

$$\mathbf{V}_J^{(k+1)} = \mathbf{M}_J^{-1} \left[\sum_{L=1}^N \mathbf{N}_{JL} \mathbf{V}_L^{(k)} + \mathbf{b}_J \right] \quad (21)$$

根据式(21), 分区之间只需要交换边界母线信息。边界母线的定义是连接两个分区之间支路的两端母线。

潮流外迭代次数限制为 I , 每个区域内潮流迭代次数限制为 K 。

隐阻抗法的完整分布式算法流程为:
每个控制区域根据节点电压等级、相序关系,
确定电压和电流的初始值。

```

For  $i := 0$ 到 $I$ 
{
  For  $k := 0$ 到 $K$  或相邻两次迭代最大电压差 $<1$  V
  每个分区根据式(21)计算节点电压,
  计算完毕后,
  通知相邻区域更新电压
}
end for结束
根据节点约束, 计算新的节点电流,
节点约束包括恒阻抗、
恒电流、恒功率等负荷模型,
也包括基于牛顿法求解的感应电机
三相电流
end for结束

```

4 仿真计算

IEEE 123 节点系统被分为 4 个区域, 区域内的母线编号分别为如表 1 所示。区域划分并非按照辐射状拓扑分区, 而是随意选节点划分区域。本文提出的算法能够满足任意形式的分区。

表 1 区域母线划分情况

Table 1 Regional bus division

区域 1- 包含母线	区域 2-包 含母线	区域 3-包 含母线	区域 4- 包含母线
25、28、 29、30、 250、25reg、 26、31、 32、27、33	151、51、50、49、 47、48、44、45、 46、42、43、40、 64、65、66	160、160reg、67、 72、76、86、77、 78、79、80、81、 82、83、84、85、 73、74、 75、68、 69、70、 71、97、98、 99、100、450、 197、101、102、 103、104、105、 106、107、108、109、 110、111、 112、113、114	其他母线

IEEE 123 节点系统, 在 47、48、49、29、30、250、50、51、151、67、97、197、105、108、67 母线接入电动机负荷, 额定功率为 6 kW, 额定线电压为 4.16 kV, 感应电机参数如表 2 所示。仿真计算中的收敛误差是指相邻两次迭代最大电压差的幅值, 潮流计算采用有名值, 由于导纳矩阵对角占优, 在本文中 β 取 0。本文中分布式计算内部迭代次数

为 $K=10$ 。外部迭代次数为 $I=100$, 程序采用 Matlab 语言编写。

表 2 感应电机参数

Table 2 Induction motor parameters

定子电阻 R_s /p.u.	定子电抗 X_s /p.u.	转子电阻 R_r /p.u.	转子电抗 X_r /p.u.	励磁电抗 X_m /p.u.
0.0053	0.106	0.007	0.12	4

4.1 浮空节点的影响

由于 IEEE 123 节点系统中存在浮空节点, 为避免潮流发散, 610 母线的 A 相节点电压被固定, 等效成电压源节点, 幅值为 277.13 V, 相角为 -60° 。

4.2 小阻抗支路的影响

在 IEEE 123 系统中存在开关建模成小阻抗支路的情况(包括支路 13-152、18-135、60-160、61-610、97-197、150-149), 在本文中小阻抗支路参数取用 Congfigure=12 的结构参数, 在不同长度情况下, 外迭代误差和次数, 如表 3 所示, 收敛精度判据为 1 V。

从表 3 中可以看出, 采用双精度计算时, 足够小的开关等值阻抗支路并不会影响计算精度和收敛性, 但是小阻抗也不能过小, 超过双精度数的精度位数, 会造成潮流发散。

表 3 阻抗值变化与计算精度关系

Table 3 Relationship between impedance value change and calculation precision

小阻抗支路的长度/ft	迭代次数	收敛误差/V
10^{-12}	发散	—
10^{-4}	51	0.974 4
10^{-3}	51	0.974 4
10^{-2}	51	0.974 6
10^{-1}	51	0.976 8

4.3 算法收敛性分析

文章采用集中计算、基于矩阵分裂的分布式计算两种算法来求解含大规模热泵的配电网三相潮流, 计算结果如图 2 所示。

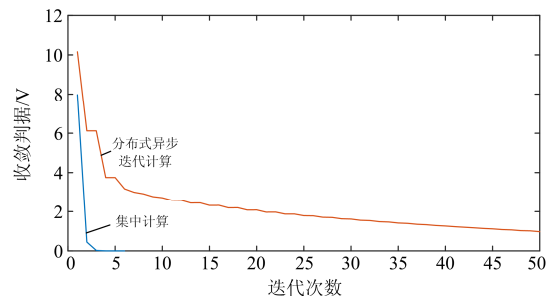


图 2 迭代次数与收敛判据变化关系

Fig. 2 Relationship between the number of iterations and the convergence criterion of change

从图2中可以看出,本文迭代次数较多,但是经过足够多的相邻分区间通信迭代计算,也能较快速收敛达到1V左右。IEEE 123四个分区之间通信关系如图3所示,仅与相邻分区交换边界信息。

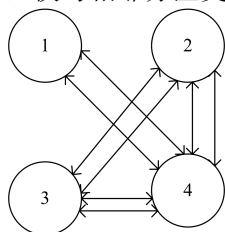


图3 四分区间通信关系

Fig. 3 Communication between four partitions

分布式计算经过156次迭代后,部分母线的三相母线电压误差百分比如图4所示,最大误差为2.5%,分布式算法可满足在配电网实际工程中的应用要求。

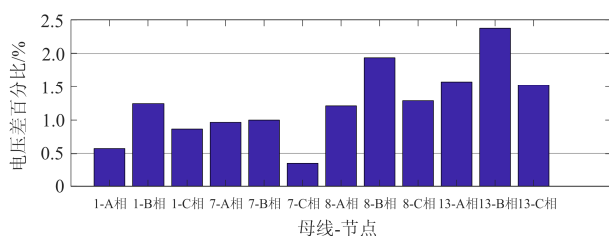


图4 部分三相母线误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of partial three-phase bus error

5 结论

本文基于矩阵分裂技术,提出了一种仅需要同相邻区域交换信息的含大规模热泵的配电网异步迭代分布式三相潮流计算方法。不同于基于牛顿法的分布式潮流计算,本文的分布式潮流计算方法基于适用于配电网的隐阻抗法进行计算。同时,文中对小阻抗支路、浮空节点等问题进行了分析与处理。由于区域间交换信息很少,配电网分布式潮流计算目前收敛速度与集中式计算相比较慢。下一步工作将会从增加交换有效信息的角度提高收敛性。

参考文献

- [1] 崔永军, 刘兆霆, 李渝, 等. 新能源电采暖电力负荷建模[J]. 电器与能效管理技术, 2016(18): 61-66.
CUI Yongjun, LIU Zhaoting, LI Yu, et al. New energy electric heating power load modeling[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(18): 61-66.
- [2] 张剑, 吴亮, 袁新润, 等. 分散电采暖在天津地区的应用分析[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(6): 33-36.
ZHANG Jian, WU Liang, YUAN Xinrun, et al. Application

- analysis of distributed electric heating in Tianjin[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(6): 33-36.
- [3] 王耀瑜, 余贻鑫. 分布式配电管理系统(DDMS)潮流分布式异步迭代算法[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(3): 19-22.
WANG Yaoyu, YU Yixin. Distributed asynchronous iterative algorithm of load flow in distributed distribution management system (DDMS)[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(3): 19-22.
- [4] 巨云涛, 吴文传, 张伯明, 等. 分布式电源三相稳态模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1509-1518.
JU Yuntao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Three-phase steady-state models for distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1509-1518.
- [5] 高亚静, 苗宏佳, 吴文传, 等. 处理不接地配电网三相潮流不收敛的变压器建模新方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 53-57.
GAO Yajing, MIAO Hongwei, WU Wenchuan, et al. A novel transformer modeling method for overcoming divergence of three-phase power flow in ungrounded power distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 53-57.
- [6] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W, SEMLYEN A, et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 753-762.
- [7] DUGAN R C, MCDERMOTT T E. An open source platform for collaborating on smart grid research[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, Detroit, USA: 1-7.
- [8] KOCAR I, MAHSEREDJIAN J, KARAAGAC U, et al. Multiphase load-flow solution for large-scale distribution systems using MANA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 908-915.
- [9] GOMEZ-EXPOSITO A, ROMERO-RAMOS E, DZAFIC I. Hybrid real-complex current injection-based load flow formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 237-246.
- [10] JU Y, WU W, ZHANG B, 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.
- [11] NGUYEN C P, FLUECK A J. A novel agent-based distributed power flow solver for smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1261-1270.
- [12] 陈颖, 沈沉, 梅生伟, 等. 基于改进 Jacobian-Free

- Newton-GMRES(m)的电力系统分布式潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 5-8.
- CHEN Ying, SHEN Chen, MEI Shengwei, et al. Distributed power flow calculation based on an improved Jacobian-free Newton-GMRES(m) method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 5-8.
- [13] SUN H, GUO Q, ZHANG B, et al. Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1484-1492.
- [14] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 分布式潮流计算异步迭代模式的补充和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 12-16.
- ZHANG Haibo, ZHANG Boming, SUN Hongbin. Supplement and improvement of asynchronous iteration mode for distributed power flow between multi-control-centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 12-16.
- [15] 赵晋泉, 徐鹏, 高宗和, 等. 基于子网边界等值注入功率的异步迭代分布式潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 11-15.
- ZHAO Jinquan, XU Peng, GAO Zonghe, et al. An asynchronous iterative distributed power flow algorithm based on the boundary bus injection power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 11-15.
- [16] KOCAR I, KARAAGAC U, MAHSEREDJIAN J, et al. Multiphase load-flow solution and initialization of induction machines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 99: 1-1.
- [17] KERSTING W H, PHILLIPS W H. Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(2): 415-420.
- [18] 巨云涛, 吴文传, 张伯明, 等. 分布式电源内阻抗引发前推回代潮流发散的问题[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6185-6190.
- JU Yuntao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Convergence problem of forward/backward sweep power flow caused by the internal impedance of distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6185-6190.
- [19] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 15-23.
- LI Peijie, LUO Cuiyun, BAI Xiaoqing, et al. An extended sequence components method for solving multiphase power flow in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 15-23.
- [20] 黄国栋, 崔晖, 许丹, 等. 安全约束经济调度中有功潮流调整方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 91-96.
- HUANG Guodong, CUI Hui, XU Dan, et al. A method of active power flow adjustment in security constrained economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 91-96.
- [21] 卢锦玲, 张津. 考虑暂态稳定约束的电力系统最优潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 24-30.
- LU Jinling, ZHANG Jin. Optimal power flow algorithm with transient stability constraints in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 24-30.
- [22] MINOT A, LU Y M, LI N. A distributed Gauss-Newton method for power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3804-3815.

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-01

作者简介:

巨云涛(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: juyuntao@cau.edu.cn

(编辑 张爱琴)