

含微电网中压系统的 PQ-同伦全局潮流计算方法

王 晶¹, 骆旭伟¹, 陈骏宇¹, 金华锋²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 江苏金智科技股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 以实现含微电网的中压系统的在线潮流计算为目标, 提出了含微电网的中压系统的 PQ-同伦全局潮流计算方法。将含微电网的中压系统分为中压系统以及由若干个微电网系统和子边界系统构成的系统, 建立了含微电网的中压系统的潮流计算模型, 并对子边界系统中的节点进行分类。提出自适应步长同伦算法对多个微电网系统进行并行潮流分析, 按照 Newton 校正环节所使用的迭代次数自动调整同伦参数的步长, 并在校正迭代不收敛情况下加入斜率补偿措施, 减小算法对迭代初值和初始步长的依赖。给出了 PQ-同伦全局潮流计算的实现框图。设计了 1 个由 IEEE 14 节点和 IEEE 4 节点系统构成的含微电网的中压系统, 并通过 MATLAB 编程对所提算法的有效性进行了验证。

关键词: 中压系统; 微电网; 全局潮流; 同伦算法; 计算; 模型

中图分类号: TM 74

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.003

0 引言

随着分布式发电(DG)及微电网技术的不断发展, 分布式发电变得灵活高效^[1-3], 并有大量并入传统电力系统的趋势。但随着微电网向更高电压等级电力系统的渗透, 传统电力系统中低压层面的结构和运行方式也随之改变^[4-6], 一些传统潮流计算方法因未考虑微电网的影响而失效。为此, 研究与大量微电网并联的中压系统的潮流计算成为必然。

与传统含配电系统的中压电力系统相比, 含微电网的中压系统由于含有大量结构和运行电压较灵活的微电网系统, 潮流计算具有以下显著特征: 微电网数目较多, 但每个微电网内部节点都较少, 利用传统潮流计算方法将导致导纳矩阵庞大, 降低求解速度; 微电网系统内含多个微源, 且与中压系统有频繁的功率双向流动, 针对配电系统的传统前推回代法并不适合求解该类网络; 微电网系统中, 电阻和电抗在同一电压等级, 利用 PQ 法实现在线潮流计算将导致误差增大; 微电网中负荷的随机性和微电网运行方式的多样性导致节点电压变化频繁, 而传统潮流计算对初值的依赖较高, 导致病态潮流、收敛困难或不收敛等问题。

近年来, 学术界针对含微电网的电力系统潮流计算问题纷纷开展了相关研究。文献[7, 9-10]对含分布式电源的配电网潮流计算展开讨论。文献[7]结合了高斯-赛德尔法和前推回代法, 成功解决了一个孤立的舰船配电网潮流计算问题。但当配电网

的节点数目较多时, 高斯-赛德尔法收敛速度较慢^[8], 且微电网系统在潮流计算中呈现闭式网络的特征, 不适合于使用前推回代法求解。文献[9]提出的基于网损灵敏度的潮流算法在求解含分布式发电的配电网潮流时效率较高, 但处理 PV 节点较麻烦且未涉及环网。文献[10]在前推回代法的基础上, 提出了注入无功补偿法, 增强了算法处理 PV 节点时的能力, 但同样未考虑环网潮流计算问题。文献[11]提出了一种利用关联矩阵直接求解带环网的配电系统潮流计算方法, 并表现出较好的效果, 但未从理论上总结出用于求解关联矩阵的通用方法。文献[12]针对发输配全局电力系统, 提出一种全局潮流计算的思路, 弥补了传统分析方法中发输电系统和配电系统完全独立进行的局限性。但对于非线性度较高、电抗值和电阻值处于统一数量级的微电网系统潮流, 其采用的 PQ 分解法和前推回代法均不适用。

同伦算法始于 20 世纪 70 年代, 是一种高效的非线性方程组的数值求解方法^[13]。它具有收敛性强、对迭代初值要求不高和并行计算易实现等优点, 逐渐被应用于电力系统的状态估计^[14]和潮流计算^[15-17]中。文献[15-17]通过改变同伦方程式的构造方式, 增强雅可比矩阵的主对角优势, 避免雅可比矩阵奇异而造成的病态, 增强潮流计算的收敛性。

本文针对含多个微电网的中压系统, 提出 PQ-同伦全局潮流计算方法, 分别利用 PQ 和同伦算法求解中压系统和多个微电网系统, 并通过子边界系统将两者连接。首先设计了含中压系统、微电网系统和子边界系统的系统模型; 然后提出含斜率补偿自适应步长调整策略的同伦算法, 并给出 PQ-同伦全局潮流计算系统框图。最后, 通过对相关案例的比较和分析, 对本文所提方法的有效性进行了验证。

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51147010, 51207139); 浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2014R403038)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51147010, 51207139) and Zhejiang College Students Technological Innovation Plan(2014R403038)

1 含微电网的中压系统模型

中压系统与 N 个微电网系统相连,构成如图 1 所示的含微电网的中压系统。图中,MV 表示中压系统, MG_i 表示第 i 个微电网系统, B_i 表示连接中压系统和第 i 个微电网的子边界系统。

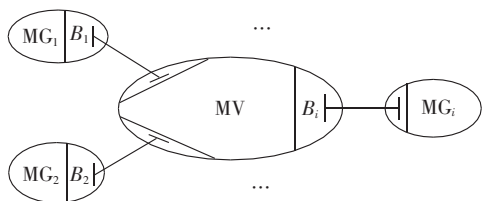


图 1 含微电网的中压系统

Fig.1 MV system with microgrids

定义 1: n 表示含微电网的中压系统内的任意节点; $B=\{B_i|i=1,2,\dots,N\}$ 表示由各子边界系统组成的边界系统集合; $C_M=\{n|n\in MV \text{ 且 } n\notin B\}$ 表示在 MV 系统中去除所有子边界系统 B_i 后所包含的节点集合,元素个数为 N_M ;对于 $\forall i\in\{1,2,\dots,N\}$, $C_{B_i}=\{n|n\in B_i\}$ 表示 B_i 所包含的节点集合, $C_{S_i}=\{n|n\in MG_i \text{ 且 } n\notin B_i\}$ 表示在 MG_i 系统中去除子边界系统 B_i 后所包含的节点集合, C_{B_i} 和 C_{S_i} 中分别有 N_{B_i} 和 N_{S_i} 个元素。

图 1 所示含微电网的中压系统的潮流方程和边界方程可以描述为:

$$S_M(\mathbf{U}_M, \mathbf{U}_B) - S_{LM}(\mathbf{U}_M, \mathbf{U}_B) = \sum_{i=1}^N S_{MB_i}(\mathbf{U}_M, \mathbf{U}_{B_i}) \quad (1)$$

$$S_{B_i}(\mathbf{U}_{B_i}) + S_{MB_i}(\mathbf{U}_M, \mathbf{U}_{B_i}) - S_{LB_i}(\mathbf{U}_{B_i}) = S_{BS_i}(\mathbf{U}_{B_i}, \mathbf{U}_{S_i}) \quad (2)$$

$$S_{S_i}(\mathbf{U}_{B_i}, \mathbf{U}_{S_i}) + S_{BS_i}(\mathbf{U}_{B_i}, \mathbf{U}_{S_i}) - S_{LS_i}(\mathbf{U}_{B_i}, \mathbf{U}_{S_i}) = 0 \quad (3)$$

其中, $i=1,2,\dots,N$; S_M 、 S_{B_i} 和 S_{S_i} 分别为 C_M 、 C_{B_i} 和 C_{S_i} 中考虑负荷后的节点注入复功率; S_{LM} 、 S_{LB_i} 和 S_{LS_i} 分别为中压系统 MV、子边界系统 B_i 和微电网系统 MG_i 的支路损耗; S_{MB_i} 和 S_{BS_i} 分别为由中压系统流入子边界系统 B_i 以及由子边界系统 B_i 流入微电网系统 MG_i 的复功率; $\mathbf{U}_B=[\mathbf{U}_{B_1}, \mathbf{U}_{B_2}, \dots, \mathbf{U}_{B_i}, \dots, \mathbf{U}_{B_N}]^T$ 为由集合 B 中各节点电压构成的电压向量; $\mathbf{U}_M$ 为由集合 C_M 中各节点电压构成的电压向量; $\mathbf{U}_{B_i}$ 和 $\mathbf{U}_{S_i}$ 分别为由集合 C_{B_i} 和集合 C_{S_i} 中各节点电压构成的电压向量。式(1)和式(3)分别表示中压系统和微电网系统的潮流方程,式(2)对应边界方程。

式(1) — (3)中所用到的变量符号和其对应的集合的关系如表 1 所示。

考虑到中压系统容量远大于微电网系统,且微电

表 1 含微电网中压系统中的变量与集合符号

Table 1 Symbols of MVSM variable and set

节点集合	节点数目	节点电压	注入功率
C_M	N_M	$\mathbf{U}_M$	S_M
C_{S_i}	N_{S_i}	$\mathbf{U}_{S_i}$	S_{S_i}
C_{B_i}	N_{B_i}	$\mathbf{U}_{B_i}$	S_{B_i}

网通常被视为中压主系统的一个可变负荷,因此,在对微电网系统 MG_i 进行潮流计算时,将子边界系统 B_i 中与 MG_i 直接相连的节点视为平衡节点;在对中压系统 MV 进行潮流计算时,将各子边界系统 B_i 中与 MV 直接相连的节点视为 PQ 节点。

2 PQ-同伦全局潮流算法

本文针对节点数日益增加的含微电网的中压系统,提出可在线运行的 PQ-同伦全局潮流算法。主要思路是:对于与中压系统相连的各个微电网系统,考虑到其内部节点少、微源数量多、电阻和电抗均不可忽略、负荷随机性强以及运行结构多样的特点,应用求解能力强大的同伦算法同步并行计算各个微电网系统的潮流分布;通过子边界系统,将各微电网系统的潮流结果交换到中压系统;利用传统的 PQ 分解法对中压系统进行潮流计算,实现整个含微电网的中压系统的全局潮流计算。

2.1 自适应步长同伦算法

2.1.1 构造同伦方程

设有一个多变量非线性方程组:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0 \quad (4)$$

其中, $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}))^T \in \mathbf{R}^m$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T \in \mathbf{R}^m$, $f_i(\mathbf{x}) = f_i[x_1, x_2, \dots, x_m]^T \in \mathbf{R}^m (i=1, 2, \dots, m)$ 。

在式(4)中引入同伦参数 $t \in [0, 1]$,并选取初始方程组 $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}(\mathbf{x}^0) = 0$,可以构造同伦映射 $\mathbf{H}(\mathbf{x}, t): D \times [0, 1] \subset \mathbf{R}^{m+1} \rightarrow \mathbf{R}^m$ (D 表示定义域),使得 $\mathbf{H}(\mathbf{x}, 0) = \mathbf{G}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{H}(\mathbf{x}, 1) = \mathbf{F}(\mathbf{x})$ 。

定义 2:同伦方程 $\mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = 0$ 是指式(5)所示的一族方程组:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = c(1-t)^b \mathbf{G}(\mathbf{x}) + t^b \mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0 \quad (5)$$

其中, b 为任意自然数; t 为同伦参数且 $t \in [0, 1]$; c 为非零的任意复数。 $b=1$ 时,式(5)称为线性同伦。

2.1.2 跟踪同伦曲线

为了求解 $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$,取 $b=1$,对式(5)求导:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{x}} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 \end{cases} \quad (6)$$

若 $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}'(\mathbf{x})$ 连续且非奇异,可将式(6)转化为微分方程的初值问题,即:

$$\begin{cases} \mathbf{x}'(t) = -[\mathbf{J}(\mathbf{x})]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}^0) \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 \end{cases} \quad (7)$$

跟踪同伦曲线的步骤如下。

步骤 1:设定迭代起点 $(\mathbf{x}^{(1)}, t^{(1)})$ 。令 $\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{x}^0$ 、 $t^{(1)} = 0$,参数 t 的迭代步长为 $h^{(1)}$ 。

步骤 2:Euler 法预估。从 $(\mathbf{x}^{(1)}, t^{(1)})$ 开始,预估同伦曲线上的下一个近似点 $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{t})$:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^{(1)} - h^{(1)} [\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(1)})]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}^0) \\ \bar{t} = t^{(1)} + h^{(1)} \end{cases} \quad (8)$$

步骤 3: Newton 校正。对 $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{t})$ 进行校正:

$$\begin{cases} \mathbf{J}(\bar{\mathbf{x}}) \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{t}) = -[\mathbf{F}(\bar{\mathbf{x}}) - (1 - \bar{t}) \mathbf{F}(\mathbf{x}^0)] \\ \mathbf{x}^{(2)} = \bar{\mathbf{x}} + \Delta \mathbf{x} \end{cases} \quad (9)$$

迭代并得到修正点 $(\mathbf{x}^{(2)}, t)$; 若不收敛, 则缩小步长 $h^{(1)}$ 后返回步骤 2。

步骤 4: 判断 $\bar{t}$ 是否等于 1。若 $\bar{t} \neq 1$, 则令 $(\mathbf{x}^{(2)}, \bar{t})$ 为新的迭代起点, 即 $\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{x}^{(2)}, t^{(1)} = \bar{t}$, 返回步骤 2; 若 $\bar{t} = 1$, 则继续步骤 5。

步骤 5: 判断 $\|\mathbf{x}^{(2)} - \mathbf{x}^0\|$ 是否满足误差要求, 若满足, 则认为 $\mathbf{x}^{(2)}$ 是方程组 (4) 的解 $\mathbf{x}^*$; 否则取 $\mathbf{x}^0 = \mathbf{x}^{(2)}$, 返回步骤 1。

2.1.3 自适应步长调整策略

为了提高算法的实用性, 本文提出含斜率补偿的自适应步长调整策略。针对 2.1.2 节步骤 3 进行了两方面的调整。

a. 校正收敛时对步长 $h^{(1)}$ 的调整。当所需迭代次数较多时 (同伦曲线波动大), 降低步长以减小累积误差; 反之, 迭代次数较少时 (同伦曲线斜率变化不大) 则增加步长以加快跟踪速度。对应的 $h^{(1)}$ 为:

$$h^{(1)} = \min \{ f(N_{\text{iter}}) + t, 1 \} - t \quad (10)$$

其中, N_{iter} 为校正迭代次数; $f(N_{\text{iter}})$ 表示与 N_{iter} 相关的函数。

步骤 3 结束后, 若校正收敛, 依据迭代次数 N_{iter} 按式 (10) 调整步长。

b. 校正不收敛时的斜率补偿环节。校正不收敛时, 在按照步骤 3 减小步长的基础上, 本文加入斜率补偿环节 $1 + \lambda \mathbf{M}_{\text{sign}}$, 以减小步骤 2 的误差。对应的 Euler 法预估公式由式 (8) 更改为:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^{(1)} - h^{(1)} [\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(1)})]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{x}^0) (1 + \lambda \mathbf{M}_{\text{sign}}) \\ \bar{t} = t^{(1)} + h^{(1)} \end{cases} \quad (11)$$

其中, λ 为补偿因子; $\mathbf{M}_{\text{sign}}$ 为最后一次 Newton 校正迭代得到的 $\Delta \mathbf{x}$ 的符号矩阵。

2.2 全局潮流计算算法

针对各微电网系统, 按照定义 2, 本文构造了如下线性同伦方程:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}) - (1 - t) \mathbf{F}(\mathbf{x}^0) = 0 \quad (12)$$

其中, $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0$ 为式 (3) 的微电网系统潮流方程; 解曲线 $\mathbf{x}(t)$ 为同伦曲线, 用于跟踪求解该微电网系统的节点电压幅值和相角; 方程 $\mathbf{H}(\mathbf{x}, 0) = 0$ 的解 $\mathbf{x}(0)$ 为该微电网系统的初始电压幅值和相角, $\mathbf{H}(\mathbf{x}, 1) = 0$ 的解 $\mathbf{x}(1)$ 为式 (3) 的潮流计算结果。

具体算法框图如图 2 所示。首先输入各子边界系统的电压初值 $\mathbf{U}_{Bi}^{(0)}$, 并置迭代计数 $k=0$ 。在进行第 $k+1$ 次迭代时, 其具体实现步骤如下。

步骤 1: 将各子边界系统电压 $\mathbf{U}_{Bi}^{(k)}$ 代入对应微电网系统 MG_i 的潮流方程 (3) 中, 利用自适应步长同伦算法同时求解每个微电网系统潮流, 得到系统运行状态, 以及各微电网系统与其对应的子边界系统 B_i 的交换功率 $S_{BSi}^{(k+1)}$ 。

步骤 2: 将功率 $S_{BSi}^{(k+1)}$ 代回各子边界方程 (2) 中, 得到各子边界系统与中压系统的交换功率 $S_{MBi}^{(k+1)}$ 。

步骤 3: 将功率 $S_{MBi}^{(k+1)}$ 代入中压系统潮流方程 (1) 中, 利用 PQ 分解法求解中压系统潮流, 得到系统电压向量 $[\mathbf{U}_M^{(k+1)}, \mathbf{U}_B^{(k+1)}]^T$ 。

步骤 4: 判断 $\max |\mathbf{U}_B^{(k+1)} - \mathbf{U}_B^{(k)}|$ 是否小于给定的收敛指标。如果小于, 迭代到此结束, 输出系统运行状态; 反之, 则转到步骤 1 继续计算。

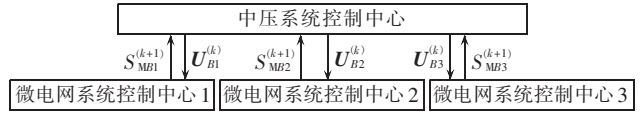


图 2 全局潮流在线计算框图

Fig.2 Block diagram of online global power flow calculation

3 算例分析

本文采用的含微电网的中压系统由 1 个 110 kV 的中压系统和 1 个 10 kV 的微电网系统组成。其中, 中压系统模型为图 3 所示的 IEEE 14 节点系统, 微电网系统模型为图 4 所示的 IEEE 4 节点系统, 中压系统的节点 6 通过变压器与微电网系统的节点 18 相连, 具体参数见文献 [18-19]。算法初始参数为: $\mathbf{x}^0 = [1, 1, 1.1, 1.05]$, $h^{(1)} = 0.04$, $\lambda = 15\%$, $f(N_{\text{iter}}) = -0.048 N_{\text{iter}} + 0.25$, 收敛精度取为 10^{-5} 。

中压系统节点集 C_M 由 IEEE 14 节点系统除去

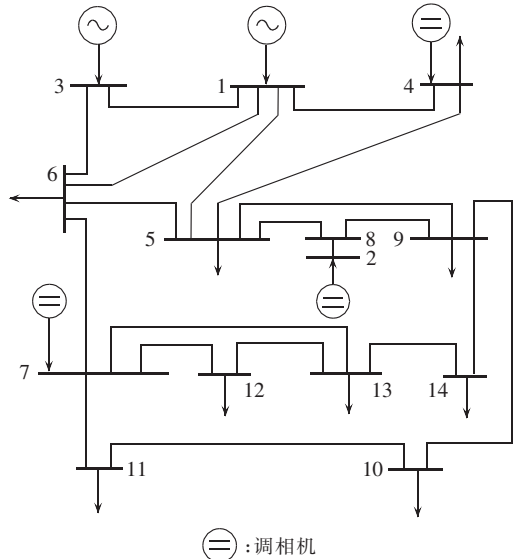


图 3 110 kV 中压系统

Fig.3 110 kV MV system

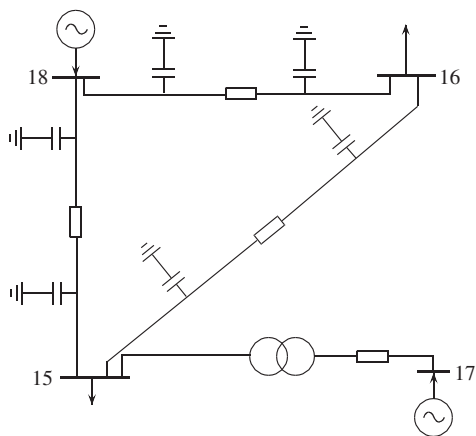


图 4 10 kV 微电网系统
Fig.4 10 kV microgrid system

节点 6 后构成,微电网系统节点集 C_{Si} 由 IEEE 4 节点系统除去节点 18 后构成,子边界系统节点集 C_{Bz} 由节点 6 和节点 18 构成。

微电网系统首先利用自适应步长同伦算法求得节点 18 的复功率,然后将该复功率传递给节点 6,再将节点 6 认为是 PQ 节点并参与中压系统潮流计算。中压系统利用 PQ 分解法进行潮流计算得到节点 6 的电压幅值和相角后,将该电压值再次传递给节点 18,然后将节点 18 处理成微电网系统的平衡节点并参与微电网系统潮流计算。整个计算中,以节点 3 为基准节点,其电压相位为 0° 。利用本文算法计算时的节点划分如表 2 所示。

表 2 节点分类
Table 2 Node classification

节点类型	中压系统	微电网系统
平衡节点	节点 3	节点 18
PV 节点	节点 1 和 2	节点 17
PQ 节点	其他节点	其他节点

3.1 PQ-同伦全局潮流计算准确性验证

在相同的收敛精度下,分别采用牛顿-拉夫逊法和 PQ-同伦全局潮流算法对本算例搭建的含微电网的中压系统进行仿真测试,计算结果如表 3 所示,表中幅值为标幺值,后同。分析表 3 可得,PQ-同伦全局潮流算法计算结果与牛顿-拉夫逊法最大幅值差为 0.0001,最大相位差为 0.018° 。因此,可以看出采用 PQ-同伦全局潮流算法得出的计算结果与采用牛顿-拉夫逊法得出的计算结果非常接近,满足在线潮流计算要求,验证了 PQ-同伦全局潮流算法的有效性。

3.2 对病态方程的求解能力

为验证本文算法对病态潮流求解能力,在图 3 所示中压系统节点 6 上挂接 20 个图 4 所示微电网,并令其中 2 个微电网中节点 15、16 间的支路发生断路。此时牛顿-拉夫逊法无法收敛于精度 10^{-5} ,而本文算法迭代 8 次后仍能正常收敛,计算结果见表 4。

表 3 节点电压对比
Table 3 Comparison of node voltage

节点	幅值		相角/ $(^\circ)$	
	牛顿-拉夫逊法	本文算法	牛顿-拉夫逊法	本文算法
1	1.0450	1.0450	-5.051	-5.0440
2	1.0900	1.0900	-11.302	-11.2840
3	1.0600	1.0600	0	0
4	0.9980	0.9980	-6.638	-6.6310
5	1.0050	1.0050	-8.126	-8.1150
6	1.0060	1.0060	-6.952	-6.9430
7	1.0450	1.0450	-12.570	-12.5550
8	1.0420	1.0420	-11.302	-11.2860
9	1.0220	1.0220	-12.982	-12.9660
10	1.0180	1.0180	-13.207	-13.1920
11	1.0280	1.0280	-13.019	-13.0050
12	1.0310	1.0310	-13.172	-13.1570
13	1.0240	1.0240	-13.417	-13.4020
14	1.0040	1.0040	-14.233	-14.2180
15	0.9632	0.9632	-7.885	-7.8750
16	0.9291	0.9291	-14.048	-14.0380
17	1.1000	1.1000	0.490	0.4800
18	1.0060	1.0059	-6.952	-6.9430

表 4 含微电网的中压系统病态潮流的解
Table4 Solution of morbid MVSM power flow calculation

节点	幅值	相角/ $(^\circ)$	节点	幅值	相角/ $(^\circ)$
1	1.045	-5.044	10	1.018	-13.192
2	1.090	-11.284	11	1.028	-13.005
3	1.060	0	12	1.031	-13.157
4	0.998	-6.631	13	1.024	-13.402
5	1.005	-8.115	14	1.004	-14.218
6	1.006	-6.943	15	0.963	-7.875
7	1.045	-12.555	16	0.929	-14.038
8	1.042	-11.286	17	1.100	-0.480
9	1.022	-12.966	18	1.006	-6.943

从表中可知,当 2 个微电网的节点 15、16 间的支路发生断路时,节点电压幅值基本不变,相角均有小幅减小。相对于传统牛顿-拉夫逊法的无法精确收敛,本文方法迭代 8 次后正常收敛,并输出系统的实时运行状态,便于对事故的及时处理。

3.3 自适应步长同伦算法性能分析

3.3.1 对初值的依赖

采用传统牛顿-拉夫逊法和本文的自适应步长同伦算法对不同初值下的微电网系统(见图 4)进行潮流计算,其中,节点 16 的电压初值取为 1 p.u. 和 0.5 p.u.,节点 15、17、18 的电压初值分别保持为 1 p.u.、1.1 p.u.、1.05 p.u.。节点 16 的计算结果如图 5 所示,图中横、纵轴均取为对应变量对数值。

由图 5(a)可见,当初始值设置在额定值附近时,牛顿-拉夫逊法和本文算法分别在迭代 4 次和 9 次后收敛,且精度相同。但是当节点 16 的电压初始值设置为 0.5 p.u.时,牛顿-拉夫逊法迭代 35 次后收敛至错误解,而本文算法迭代 11 次后仍收敛至正确解,如图 5(b)所示。因此,相比于牛顿-拉夫逊法,本

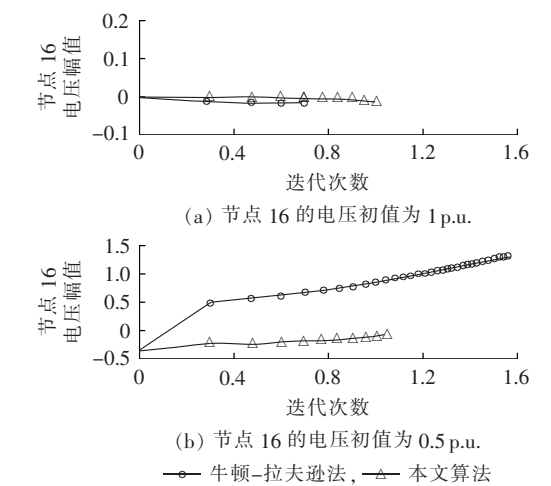


图 5 对迭代初值的依赖性测试结果
Fig.5 Results of initial-value dependence test

文算法收敛性更好,对迭代初值依赖较低。
3.3.2 对初始步长的依赖

选取 8 组不同的初始步长,并利用传统同伦算法和本文算法对微电网系统(见图 4)进行潮流计算,对应的误差分析以及初始步长对迭代次数的影响分别如表 5 和图 6 所示。

表 5 初始步长对节点电压幅值和相角的影响
Table 5 Effect of initial step on amplitude and phase of node voltage

编号	初始步长	最大误差/%	平均误差/%	迭代次数
1	0.55	10.76,0	3.61,0	2,2
2	0.50	0,0	0,0	2,2
3	0.40	20.32,0	7.69,0	3,3
4	0.30	20.84,0	7.79,0	4,3
5	0.15	5.15,0	1.94,0	7,5
6	0.10	0,0	0,0	10,6
7	0.05	0,0	0,0	20,9
8	0.01	0,0	0,0	100,15

注:第 3—5 列中,逗号前、后分别对应传统同伦算法和本文算法所得数据。

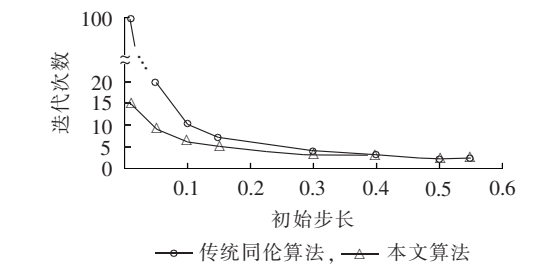


图 6 初始步长对迭代次数的影响
Fig.6 Effect of initial step on iteration times

表 5 中,由于传统同伦算法采用定步长跟踪方式,若 1 不能被参数 t 的步长 $h^{(1)}$ 整除(如表 5 中初始步长 0.55、0.30 等),则同伦跟踪结束时 t 值就不能精确跟踪到 1,而只能保证跟踪停止在 1 附近,因此造成计算的误差。尽管可以通过减小参数 t 的步长减小误差,但由图 6 可见,随着步长的减小,迭代次

数大幅增加,降低计算的效率。
相比于传统同伦算法,本文算法对初始步长的依赖较小,收敛精度良好,收敛速度较快。

4 结论

本文搭建了含多个微电网的中压系统潮流计算模型,并提出 PQ-同伦全局潮流算法。算例分析表明:本文算法能够有效地实现系统的全局潮流计算,且算法精度高;在牛顿-拉夫逊法不收敛的病态潮流中,本文算法仍能正常收敛,表现出较强的收敛性;本文算法中的自适应步长同伦算法在对迭代初值和初始步长的依赖性方面得到了较好的改善,同时降低了算法的迭代次数。

本文算法通过并行计算的方式完成了各个微电网的潮流计算,计算过程相对独立,后期将通过搭建相关硬件仿真平台,并编写相关通信程序,验证本文方法在计算速度上的优越性。

参考文献:

[1] 袁越,李振杰,冯宇,等. 中国发展微网的目的、方向、前景[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):59-63.
YUAN Yue,LI Zhenjie,FENG Yu,et al. Development purposes, orientations and prospects of microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):59-63.

[2] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(19):100-107.

[3] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran,MA Huizhuo,ZHU Jinyao,et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):6-13.

[4] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14.
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the microgrid and smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14.

[5] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.
CHEN Wei,AI Xin,WU Tao,et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):26-32,39.

[6] 杨雄,卫志农,孙国强,等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):99-107,131.
YANG Xiong,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Decoupled three-phase power flow calculation for distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):99-107,131.

[7] HUANG Jing,ZHANG Xiaofeng,YE Zhihao. A combined load flow method for large shipboard power systems[C]//Proceedings

- of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China; IEEE, 2009: 1-6.
- [8] 王振树, 林梅军, 刘岩, 等. 考虑光伏并网的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 178-185.
- WANG Zhenshu, LIN Meijun, LIU Yan, et al. Power flow algorithm for distribution network with photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 178-185.
- [9] 杨旭英, 段建东, 杨文字, 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.
- YANG Xuying, DUAN Jiandong, YANG Wenyu, et al. Power flow calculation based on power losses sensitivity for distribution system with distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 139-143.
- [10] 李新, 彭怡, 赵晶晶, 等. 分布式电源并网的潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 39(17): 78-81, 87.
- LI Xin, PENG Yi, ZHAO Jingjing, et al. Power flow calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 39(17): 78-81, 87.
- [11] TENG J H. A direct approach for distribution system load flow solutions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [12] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 发输配全局电力系统分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 17-19.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. Comprehensive power system analysis including transmission and distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 17-19.
- [13] 王则柯, 高堂安. 同伦方法引论[M]. 重庆: 重庆出版社, 1990: 21-25.
- [14] 祝滨, 刘耀年, 祝洪博. 神经网络的同伦算法与电力系统状态估计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(1): 11-14, 19.
- ZHU Bin, LIU Yaonian, ZHU Hongbo. Homotopy method of neural network and power system state estimation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2000, 12(1): 11-14, 19.
- [15] 谷根代, 赵金峰, 王晓昆. 电力系统潮流多解的同伦算法[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(7): 21-23.
- GU Gendai, ZHAO Jinfeng, WANG Xiaokun. Homotopy method to find all solutions of power flow equations for electric power systems[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(7): 21-23.
- [16] 王晓昆. 电力系统潮流的同伦算法[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- WANG Xiaokun. Homotopy method of power system load flow [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [17] 周佃民, 廖培金. 电力系统病态潮流的同伦方法求解[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5-6): 67-71.
- ZHOU Dianmin, LIAO Peijin. Homotopy method for ILL-conditioned power system load flow calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(5-6): 67-71.
- [18] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下册)[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 61-73.
- [19] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2007: 323-325.

作者简介:



王 晶

王 晶(1974—), 女, 河南邓县人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统建模、电能质量仿真与识别、人工智能方法在电力系统中的应用、微电网控制方法等(E-mail: kmhelen@zjut.edu.cn);

骆旭伟(1992—), 男, 浙江建德人, 通信作者, 主要研究方向为智能方法在微电网中的应用(E-mail: 694536286@qq.com);

陈骏宇(1990—), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为智能方法在微电网中的应用;

金华锋(1972—), 男, 浙江上虞人, 研究员级高级工程师, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护、安全自动装置和新能源的应用。

PQ-homotopy method for calculating global power flow of MV system with microgrids

WANG Jing¹, LUO Xuwei¹, CHEN Junyu¹, JIN Huafeng²

(1. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. WISCOM Company, Nanjing 211100, China)

Abstract: A PQ-homotopy method is proposed for online calculating the global power flow of MVSM (Medium-Voltage System with Microgrids), which establishes the power flow calculation model by dividing the MVSM into a MV system and several subsystems composed of microgrid system and sub-boundary system, and classifies the nodes of the sub-boundary systems. The adaptive homotopy method is applied to analyze in parallel the power flows of multiple microgrids and the step of its homotopy parameter is automatically adjusted according to the iteration times used in Newton correction. The slope compensation measure is added when the correction iteration is not convergent to weaken its dependence on the initial value and step. The block diagram of its implementation is given. A MVSM consisting of IEEE 4-bus and IEEE 14-bus system is designed and the validity of the proposed method is verified in MATLAB environment.

Key words: medium-voltage system; microgrid; global power flow; homotopy method; calculations; models