

中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目： 输配一体化潮流计算收敛性分析及提升方法
作者： 陈一丰，唐坤杰，董树锋，宋永华
网络首发日期： 2022-03-07
引用格式： 陈一丰，唐坤杰，董树锋，宋永华. 输配一体化潮流计算收敛性分析及提升方法[J/OL]. 中国电机工程学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220303.0824.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

输配一体化潮流计算收敛性分析及提升方法

陈一丰¹, 唐坤杰¹, 董树锋^{2*}, 宋永华³

- (1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;
2. 清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京市 100084;
3. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门特别行政区 999078)

Convergence Analysis and Promotion Method of Power Flow Calculation of Integrated Transmission and Distribution Networks

CHEN Yifeng¹, TANG Kunjie¹, DONG Shufeng^{2*}, SONG Yonghua³

- (1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;
2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. The State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China)

ABSTRACT: With the increasing complexity of power grid operation mode, the convergence of traditional integrated power flow calculation is deteriorating. In view of this situation, this paper proposes an anderson-acceleration-based power flow method. Firstly, the integrated power flow calculation of transmission and distribution networks is abstracted into a simple fixed point iteration form, and its convergence is analyzed by using the fixed point iteration theory. Then, according to the iterative nature of power flow calculation, combined with the idea of anderson acceleration in the fixed point field, the anderson-acceleration-based power flow method is proposed. Besides the equivalent method is used to improve the convergence performance of the method in the network with loops. Finally, in the part of case study, the accuracy of the proposed method is firstly verified, and then the convergence performance of the proposed method is compared with the existing methods in various scenarios, hence the advantages of the proposed method in convergence performance are verified.

KEY WORDS: power flow calculation of integrated transmission and distribution networks; convergence; fixed point theory

摘要: 随着电网运行方式日趋复杂, 传统的输配一体化潮流计算面临收敛性恶化的问题, 针对这一现状, 本文提出了一种基于安德森加速的输配一体化潮流计算方法。首先将输配一体化潮流计算抽象为简单的不动点迭代形式, 利

用不动点迭代理论对其进行收敛性分析。接着, 根据潮流计算的迭代本质, 结合不动点领域中安德森加速的思想, 提出了基于安德森加速的输配一体化潮流计算方法。然后利用环网等效的方法提高了该方法处理环网时的收敛性能。最后, 在算例分析部分, 首先验证了所提方法的精确性, 然后在多个场景下比较本文方法和已有方法的收敛性能, 验证了本文所提方法在收敛性能上的优越性。

关键词: 输配一体化潮流计算; 收敛性; 不动点理论

0 引言

在传统的分层分级调度模式下, 输电网和配电网分别由不同的调度中心进行管理, 一般输电网由能量管理系统(energy management system, EMS)进行管理, 而配电网由配电管理系统(distribution management system, DMS)进行管理。由于不同调度管理系统之间数据是不透明的^[1], 它们之间只是进行有限且必要的信息交互, 因此, 在分析计算时, 输配电网几乎是割裂的, 它们各自的调度中心只对于其管辖的内部网络进行详细建模, 对于外部网络一般采用理想化的等值建模^[2]。

然而, 随着分布式电源(distributed generation, DG)和分布式储能的广泛接入, 配电网的主动性大大增强^[3,4], 配电网的结构和运行方式日趋复杂, 配电网的潮流将对输电网造成不可忽视的影响, 同时输电网潮流也会反作用于配电网^[5,6]。这样的双向功率流动使得输配网之间的耦合性显著提升,

而传统的基于等值建模的独立分析方法不能适应输配网波动带来的不确定性。在此背景下学界提出了一系列输配一体化化计算分析的方法^[7-19]。

关于输配一体化潮流计算,目前最广泛应用的是主从分裂法^[10,11](master-slave-splitting power flow method, MSSM),它结合我国调度管理的特点,利用输配电网间有限的交互信息,在配电网潮流计算中将输电网处理为电源,而在输电网潮流计算中将配电网处理为负荷,通过交替迭代的方式更新潮流解直至收敛。然而主从分裂法在提出的时候并没有考虑到电网场景的复杂性和多样性,随着各种实际案例被提出并进行研究,传统主从分裂法的收敛性问题逐渐暴露出来,在配网分布式电源广泛接入,配电网成环,配网重载等场景下,它往往面临着收敛速度缓慢甚至发散的问题,因此有必要研究提升其收敛性能的方法。

目前关于输配一体化潮流计算收敛性的研究较少,已有的文献主要从解决具体收敛性恶化问题的角度展开。文献[12]考虑存在环状配电网时收敛性恶化的问题,将环状配电网的环状等值网络和循环功率考虑到输电潮流方程中,计算等效后的边界虚拟功率和等效导纳矩阵作为输电网潮流计算的参数,从而构造了新的主从分裂迭代格式。该算法能够在含环状配电网的情况下减少潮流计算迭代收敛的次数,让传统方法下发散的算例收敛,同时对于辐射状配电网,等效后也不改变迭代次数。文献[20]考虑配电网重载的情况下收敛性恶化的问题,采用戴维宁定理,将输电网等效为一个电压源和阻抗接入配电网进行配电网潮流计算,同样以等效的思路构造了新的主从分裂迭代格式,能够在配电网重载的情况下减少潮流计算迭代收敛的次数。但是由于戴维宁定理一般只适用于线性网络,而输电网属于非线性网络,该方法的潮流计算结果相比传统主从分裂法计算得到的精确解存在误差。文献[21]考虑分布式电源接入配电网导致潮流计算收敛性恶化的问题,分析输电网和配电网迭代收敛过程,通过求交叉点的方式,每两次迭代对电压进行一次修正,提出逐次交叉逼近的潮流计算方法(successive-intersection-approximation-based power flow method, SIAM),从而加快了潮流计算的收敛速度。

上述研究在各自的场景下,提出了各自的输

配一体化潮流计算收敛性提升方法。为了从更一般性的角度来解决潮流计算的收敛性问题,本文通过分析输配一体化潮流计算的数学本质,将数学理论应用于收敛性分析和提升当中。因此,本文的主要贡献如下:

1)通过推导将输配一体化潮流计算抽象为数学中的不动点迭代问题;

2)结合不动点理论对潮流计算的收敛性进行分析,提出了潮流计算的收敛性指标,反映不同案例下潮流计算的收敛性强弱;

3)基于迭代加速的思想,提出了一种基于安德森加速的输配一体化潮流计算方法(anderson-acceleration-based power flow method, AAM),有效地提升了潮流计算的收敛性能。

1 输配一体化潮流计算的收敛性

1.1 输配一体化系统潮流计算

通常,输配一体化系统被分为三个部分,输电网、配电网和中间变电站,三者之间的关系如图1所示,其中变电站处的节点被称为边界节点。

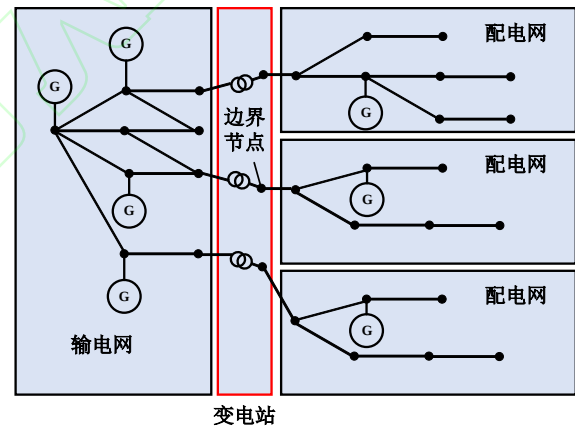


图1 输配一体化系统

Fig. 1 Integrated transmission and distribution system

在潮流计算时,输配一体化系统模型可以用数学式表示为:

$$G_D(U_B)=U_D \quad (1)$$

$$G_B(U_D, U_B)=S_B \quad (2)$$

$$G_T(S_B)=U_B \quad (3)$$

上式中 T 表示输电网, B 表示变电站, D 表示配电网, 式(1)表示配电网中的潮流计算, 给定变电站处的边界节点电压作为配电网的电压源, 通过计算得到配电网各节点电压, 式(2)表示变电站的计算式, 给定配电网和边界节点电压, 得到边界节点功率, 式(3)表示输电网中的潮流计算, 给定

边界节点的功率作为输电网中的负荷，通过计算得到边界节点的电压。

根据式(1)~(3)，输配一体化潮流计算的具体步骤如下：

- 1) 初始化边界状态变量 $\mathbf{U}_B^{(0)}$ ，迭代次数 $k=0$ 以及收敛精度 ε ；
- 2) 由式(1)求解配电网潮流，给定 $\mathbf{U}_B^{(k)}$ 求得 $\mathbf{U}_D^{(k+1)}$ ，然后由式(2)，根据 $\mathbf{U}_B^{(k)}$ ， $\mathbf{U}_D^{(k+1)}$ 求得 $\mathbf{S}_B^{(k+1)}$ ；
- 3) 由式(3)求解输电网潮流，给定 $\mathbf{S}_B^{(k+1)}$ 求得 $\mathbf{U}_B^{(k+1)}$ ；
- 4) 如果 $\|\mathbf{U}_B^{(k+1)} - \mathbf{U}_B^{(k)}\| < \varepsilon$ ，算法收敛，停止迭代，否则令 $k=k+1$ ，返回步骤 2。

1.2 输配一体化潮流计算的不动点迭代形式

输配一体化潮流计算从数学形式上可以进行简化，本文将其抽象为不动点迭代形式，从不动点理论出发来分析其收敛性并提出收敛性提升方法。

将式(1)代入式(2)，得到：

$$\mathbf{G}_B(\mathbf{G}_D(\mathbf{U}_B), \mathbf{U}_B) = \mathbf{S}_B \quad (4)$$

将 $\mathbf{G}_B(\mathbf{G}_D(\cdot), \cdot)$ 记为 $\mathbf{G}_{BD}(\cdot)$ ，式(4)简化为：

$$\mathbf{G}_{BD}(\mathbf{U}_B) = \mathbf{S}_B \quad (5)$$

然后将式(5)代入(3)，得到：

$$\mathbf{G}_T(\mathbf{G}_{BD}(\mathbf{U}_B)) = \mathbf{U}_B \quad (6)$$

将 $\mathbf{G}_T(\mathbf{G}_{BD}(\cdot))$ 记为 $\mathbf{f}(\cdot)$ ，式(6)化简为：

$$\mathbf{f}(\mathbf{U}_B) = \mathbf{U}_B \quad (7)$$

上式恰好是一个不动点问题，因此输配一体化潮流计算可以通过不动点迭代求解：

$$\mathbf{U}_B^{(k+1)} = \mathbf{f}(\mathbf{U}_B^{(k)}) \quad (8)$$

1.3 输配一体化潮流计算的收敛性分析

下面从不动点的收敛性定理^[22]出发对输配一体化潮流计算的收敛性进行推导。

定理 1 假定迭代映射 Φ 在 $x^* \in \text{int}(D)$ 处可导， x^* 为 Φ 的不动点，若在 x^* 处有：

$$\rho\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right) < 1 \quad (9)$$

则不动点迭代局部收敛。 ρ 表示矩阵的谱半径，若 $\rho(\cdot)$ 越小，收敛越快。

不妨将式(9)称为不动点迭代的收敛性条件，则输配一体化潮流计算的收敛性条件推导如下：

令 $\mathbf{y}_B = \mathbf{G}_{BD}(\mathbf{U}_B)$ ，若迭代映射 $\mathbf{f}$ 不动点附近可导，由式(6)、(7)有：

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{U}_B}\right) = \rho\left(\frac{\partial \mathbf{G}_T}{\partial \mathbf{y}_B} \cdot \frac{\partial \mathbf{y}_B}{\partial \mathbf{U}_B}\right) < 1 \quad (10)$$

该条件可以强化为：

$$\left\|\frac{\partial \mathbf{G}_T}{\partial \mathbf{y}_B}\right\| \cdot \left\|\frac{\partial \mathbf{y}_B}{\partial \mathbf{x}_B}\right\| < 1 \quad (11)$$

$\|\cdot\|$ 表示矩阵的算子范数。

具体的有：

$$\frac{\partial \mathbf{G}_T}{\partial \mathbf{y}_B} = \left(\frac{\partial (V_B, \theta_B)}{\partial (P_B, Q_B)}\right)_T = \mathbf{S}_T \quad (12)$$

和

$$\frac{\partial \mathbf{y}_B}{\partial \mathbf{x}_B} = \left(\frac{\partial (P_B, Q_B)}{\partial (V_B, \theta_B)}\right)_D = \mathbf{S}_D \quad (13)$$

$\mathbf{S}_T$ 表示输电网中边界节点电压对功率的灵敏度矩阵， $\mathbf{S}_D$ 表示配电网中边界节点功率对节点电压的灵敏度矩阵，下标 T 和 D 分别表示输电网和配电网。

在输配电网中，如果采用 PQ 分解法的思路简化近似潮流计算，即 P_B 仅与 θ_B 有关， Q_B 仅与 V_B 有关，忽略相角变化对灵敏度的影响，式(11)所示的收敛性条件可以近似为：

$$\left\|\left(\frac{\partial V_B}{\partial Q_B}\right)_T\right\| \cdot \left\|\left(\frac{\partial Q_B}{\partial V_B}\right)_D\right\| = r_T \cdot r_D = r < 1 \quad (14)$$

r_T 是输电网中 V_B 对 Q_B 的灵敏度， r_D 是配电网中 Q_B 对 V_B 的灵敏度，两者的乘积 r 作为收敛性指标，来衡量输配一体化潮流计算的收敛性强弱。

由于配电网的主动性日渐增强，比如分布式电源接入，环状配电网的出现等等，这些因素都不能简单地用非线性方程来描述，然而已有的灵敏度计算方法都是基于电力系统静态拓扑和模型参数构建的非线性方程，不能将分布式电源的调

节能力, 环网的功率流动等因素考虑进去, 因此本文绕开潮流方程求导, 通过添加一个小扰动的方式来计算灵敏度。收敛性指标的计算方法如下:

假设一个输电网总共接有 s 个配电网, 考虑到环状配电网可能有多个接入点, 设配电网的边界节点数为 $n_1, n_2, \dots, n_s$, 总边界节点数为 m 。

1) 初始化边界状态变量 V_B 、 θ_B ;

2) 对于配电网 i ($i=1,2,\dots,s$), 由给定的 $V_{Bi}^1, \dots, V_{Bi}^{n_i}, \theta_{Bi}^1, \dots, \theta_{Bi}^{n_i}$ 计算一次潮流, 得到边界节点有功 $P_{Bi}^1, \dots, P_{Bi}^{n_i}$ 和无功 $Q_{Bi}^1, \dots, Q_{Bi}^{n_i}$;

3) 将 V_{Bi}^j 增加一个极小的扰动 α , 由 $V_{Bi}^j + \alpha$, θ_{Bi}^j 计算一次潮流, 得到新的边界节点无功 $Q_{Bi}^{j1}, \dots, Q_{Bi}^{jn_i}$ ($j=1,2,\dots,n_i$);

4) 配电网的灵敏度矩阵 J_D 计算如下:

$$J_{Di} = \left(\frac{\partial Q_B}{\partial V_B} \right)_{Di} = \begin{bmatrix} \frac{Q_{Bi}^{11} - Q_{Bi}^1}{\alpha} & \dots & \frac{Q_{Bi}^{n_i 1} - Q_{Bi}^{n_i}}{\alpha} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Q_{Bi}^{1n_i} - Q_{Bi}^1}{\alpha} & \dots & \frac{Q_{Bi}^{n_i n_i} - Q_{Bi}^{n_i}}{\alpha} \end{bmatrix}_{n_i \times n_i} \quad (15)$$

$$J_D = \begin{bmatrix} J_{D1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{D2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{Ds} \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (16)$$

5) 将配电网的潮流计算结果通过边界节点同步到输电网, 计算输电网潮流, 得到边界节点电压 $V_T^1, \dots, V_T^m$;

6) 将 Q_T^k 增加一个极小的扰动 β , 由 $Q_T^k + \beta$ 计算输电网潮流, 得到边界节点电压 $V_T^{k1}, \dots, V_T^{km}$ ($k=1,2,\dots,m$);

7) 输电网的灵敏度矩阵 J_T 计算如下:

$$J_T = \begin{bmatrix} \frac{V_T^{11} - V_T^1}{\beta} & \dots & \frac{V_T^{n_1 1} - V_T^{n_1}}{\beta} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{V_T^{1n_1} - V_T^1}{\beta} & \dots & \frac{V_T^{n_1 n_1} - V_T^{n_1}}{\beta} \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (17)$$

8) 根据输配电网的灵敏度矩阵计算收敛性指标:

$$r = r_D \cdot r_T = \|J_D\| \cdot \|J_T\| \quad (18)$$

这一指标能够反映输配一体化潮流计算的收敛性强弱, 根据定理 1, 当 r 小于 1 时潮流计算能够稳定收敛, 当 r 大于 1 时潮流计算可能发散, 并且 r 越小, 潮流计算的收敛速度越快, 收敛所需

的迭代次数越少。本文的算例分析部分通过计算各个算例对应的收敛性指标, 比较不同输配网络的收敛性能差异, 从而分析分布式电源、环状配电网、配网重载等因素对潮流计算收敛性能的影响。

2 基于不动点迭代的收敛性提升方法

2.1 基于安德森加速的输配一体化潮流计算方法

根据 1.2 节的推导, 输配一体化潮流计算从数学上可以理解为边界节点电压的反复迭代, 相当于输配网络利用当前的边界节点电压, 运行一次配网潮流计算, 一次输电网潮流计算, 然后更新边界节点电压。这种方式只利用当前值进行下一次迭代更新, 而已有的不动点加速方法证明, 之前的迭代值也可以被利用起来对计算结果进行修正, 从而加速收敛。

本文考虑在 DMS 中存储之前的迭代值, 综合利用多次迭代值进行边界节点电压的更新, 从而提高潮流计算的收敛性能。更新方式采用了安德森加速^[23]的思想, 具体方法如下所述。

首先设定一个参数 m , 它表示 DMS 对前 m 步的迭代值进行存储, 并利用前 m 步的迭代值对当前值进行更新。接着根据 m 计算系数 m_k :

$$m_k = \min\{m, k\}, \quad k \geq 0 \quad (19)$$

式中 k 表示迭代次数, 当 k 小于 m 时, 系统只能利用前 k 步的迭代值进行更新, 而当 k 大于等于 m 时, 利用前 m 步的迭代值进行更新。

因此, 新的迭代值 $\tilde{U}_B^{(k+1)}$ 由前 m_k 步迭代值和当前的迭代值加权得到:

$$\tilde{U}_{k+1} = \sum_{j=0}^{m_k} \alpha_j^k f(U^{(k-m_k+j)}) \quad (20)$$

为了使 $\tilde{U}_B^{(k+1)}$ 更接近于不动点问题 $x=f(x)$ 的解, 设定不动点问题的残差为:

$$g(x) = x - f(x) \quad (21)$$

式(20)的系数 $\alpha^k = (\alpha_0^k, \dots, \alpha_{m_k}^k)$ 通过求解一个令残差最小的优化问题得到:

$$\min \left\| \sum_{j=0}^{m_k} \alpha_j g(U^{(k-m_k+j)}) \right\| \quad \text{s.t.} \quad \sum_{j=0}^{m_k} \alpha_j = 1 \quad (22)$$

这一优化问题可以转化为无约束的最小二乘

问题直接求解, 定义系数集合 $\gamma = (\gamma_0, \dots, \gamma_{m_k-1})$ 满足:

$$\begin{cases} \alpha_0 = \gamma_0, i = 0 \\ \alpha_i = \gamma_{i+1} - \gamma_i, 1 \leq i \leq m_k - 1 \\ \alpha_{m_k} = 1 - \gamma_{m_k-1} \end{cases} \quad (23)$$

则原问题(22)可转化为:

$$\min \|g_k - Y_k \gamma\| \quad (24)$$

式中, $g_k = g(U_B^{(k)})$, $Y_k = [y_{k-m_k}, \dots, y_{k-1}]$,

$$y_i = g_{i+1} - g_i.$$

如果矩阵 Y_k 满秩, 则(24)的解为:

$$\gamma_k = (Y_k^T Y_k)^{-1} Y_k^T g_k \quad (25)$$

因此, 求解 $\tilde{U}_B^{(k+1)}$ 的迭代式为:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_B^{(k+1)} &= f(U_B^{(k)}) - \sum_{i=0}^{m_k-1} \gamma_i^k [f(U_B^{(k-m_k+i+1)}) - f(U_B^{(k-m_k+i)})] \\ &= f(U_B^{(k)}) - (S_k - Y_k)(Y_k^T Y_k)^{-1} Y_k^T g_k \end{aligned} \quad (26)$$

式中, $S_k = [s_{k-m_k}, \dots, s_{k-1}]$, $s_i = U_B^{(i+1)} - U_B^{(i)}$.

综上, 矩阵 S_k 、 Y_k 分别存储了最新的 m_k 个迭代值之差和残差之差, 输配网络每运行一次潮流计算, DMS 就根据当前的边界节点电压对 S_k 、 Y_k 进行更新, 然后根据式(26)计算新的迭代值。AAM 算法的具体步骤为:

1) 初始化边界节点电压 $U_B^{(0)}$;

2) 由式(1)求解配电网潮流, 给定 $U_B^{(0)}$ 求得

$U_D^{(1)}$, 然后由式(2), 根据 $U_B^{(0)}$, $U_D^{(1)}$ 求得 $S_B^{(1)}$;

3) 由式(3)求解输电网潮流, 给定 $S_B^{(1)}$ 求得

$U_B^{(1)}$, 求 $g_0 = U_B^{(0)} - U_B^{(1)}$;

4) 初始化迭代次数 $k=1$, 收敛精度 ε , 参数 m ;

5) 求解配电网潮流, 给定 $U_B^{(k)}$ 求得 $U_D^{(k+1)}$,

然后根据 $U_B^{(k)}$, $U_D^{(k+1)}$ 求得 $S_B^{(k+1)}$;

6) 求解输电网潮流, 给定 $S_B^{(k+1)}$ 求得 $U_B^{(k+1)}$,

求 $g_k = U_B^{(k)} - U_B^{(k+1)}$, $s_{k-1} = U_B^{(k)} - U_B^{(k-1)}$,

$y_{k-1} = g_k - g_{k-1}$;

7) 求解 Y_k , S_k

如果 $k < m$

$$S_k = [S_{k-1} \quad s_{k-1}] \quad (27)$$

$$Y_k = [Y_{k-1} \quad y_{k-1}] \quad (28)$$

否则

$$S_k = \begin{bmatrix} S_k & \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \end{bmatrix} s_{k-1} \quad (29)$$

$$Y_k = \begin{bmatrix} Y_{k-1} & \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \end{bmatrix} y_{k-1} \quad (30)$$

I 代表一个 $m-1$ 维的单位矩阵;

8) 根据下式更新迭代值 $U_B^{(k+1)}$:

$$U_B^{(k+1)} = \begin{cases} U_B^{(k+1)}, k=0 \\ U_B^{(k+1)} - (S_k - Y_k) \cdot ((Y_k^T Y_k)^{-1} Y_k^T g_k), k \geq 1 \end{cases} \quad (31)$$

9) 如果 $\|U_B^{(k+1)} - U_B^{(k)}\| < \varepsilon$, 表示算法收敛,

停止迭代。否则令 $k=k+1$, 返回步骤 5。

应用 AAM 时, 预设定的参数 m 表示 DMS 存储前 m 步的迭代值用来更新当前迭代值, 显然, m 取不同的值, 相应 AAM 的收敛性能有所不同。算例分析部分通过实验探讨了不同的 m 取值对 AAM 收敛性能的影响。

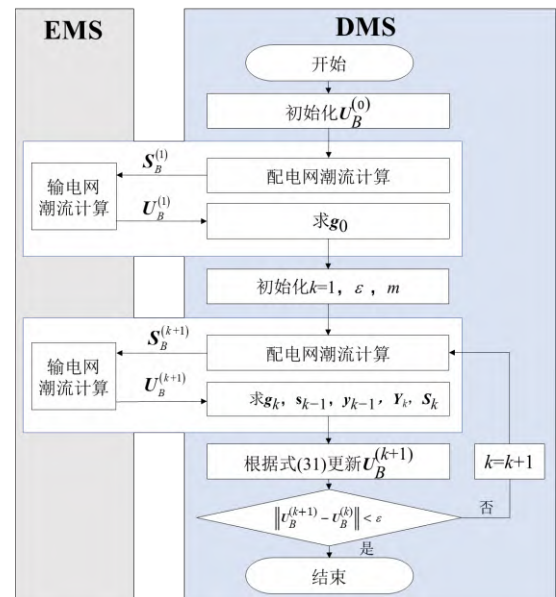


图 2 AAM 算法执行流程图

Fig. 2 Flow chart of AAM algorithm execution

2.2 环状配电网的等效处理方法

当存在环状配电网时,潮流计算的收敛性将严重恶化,这是由于环状网络中的环路循环功率受边界电压的影响大,从而导致配电网中 Q_B 对 V_B 的灵敏度偏大^[12]。如果将环路循环功率等效到输电网中,则配电网将恢复成辐射状, r_D 恢复成正常大小,下面以一次输配网潮流计算为例说明等效方法:

配电网潮流计算形式不变,由给定的 $U_B^{(k)}$ 求得 $U_D^{(k+1)}$, 然后根据 $U_B^{(k)}$ 、 $U_D^{(k+1)}$ 求得 $S_B^{(k+1)}$ 。针对环状配电网,要计算配电网环路的等值导纳阵 Y_{eq} 。假设 Y_D 代表配电网初始导纳阵, n_r 代表馈线数, n_D 代表配网节点数

$$Y_D = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & \cdots & Y_{1,n_r} & Y_{1,n_r+1} & \cdots & Y_{1,n_D} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n_r,1} & \cdots & Y_{n_r,n_r} & Y_{n_r,n_r+1} & \cdots & Y_{n_r,n_D} \\ Y_{n_r+1,1} & \cdots & Y_{n_r+1,n_r} & Y_{n_r+1,n_r+1} & \cdots & Y_{n_r+1,n_D} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n_D,1} & \cdots & Y_{n_D,n_r} & Y_{n_D,n_r+1} & \cdots & Y_{n_D,n_D} \end{bmatrix} \quad (32)$$

配网环路等效导纳阵为:

$$Y_{eq} = Y_{11} - Y_{12} Y_{22}^{-1} Y_{21} \quad (33)$$

其中

$$Y_{11} = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & \cdots & Y_{1,n_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n_r,1} & \cdots & Y_{n_r,n_r} \end{bmatrix} \quad Y_{12} = \begin{bmatrix} Y_{1,n_r+1} & \cdots & Y_{1,n_D} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n_r,n_r+1} & \cdots & Y_{n_r,n_D} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$Y_{21} = \begin{bmatrix} Y_{n_r+1,1} & \cdots & Y_{n_r+1,n_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n_D,1} & \cdots & Y_{n_D,n_r} \end{bmatrix} \quad Y_{22} = \begin{bmatrix} Y_{n_r+1,n_r+1} & \cdots & Y_{n_r+1,n_D} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n_D,n_r+1} & \cdots & Y_{n_D,n_D} \end{bmatrix}$$

在输电网潮流计算时,将配网等效环路的导纳和功率考虑进去,输电网导纳阵修改为:

$$Y_T(\sigma(i), \sigma(j)) = Y_T(\sigma(i), \sigma(j)) + Y_{eq}(i, j), 1 \leq i, j \leq n_r \quad (35)$$

$\sigma(i)$ 表示配电网中的第 i 个节点对应到输电网中的节点编号。

输电网的等效功率修改为:

$$P_B^{(k+1)} = P_B^{(k+1)} - \text{Re} \left(\text{diag} \left\{ \dot{U}_B^{(k)} \right\} \bar{Y}_{eq} \bar{\dot{U}}_B^{(k)} \right) \quad (36)$$

$$Q_B^{(k+1)} = Q_B^{(k+1)} - \text{Im} \left(\text{diag} \left\{ \dot{U}_B^{(k)} \right\} \bar{Y}_{eq} \bar{\dot{U}}_B^{(k)} \right)$$

其中

$$\dot{U}_B^{(k)} = V_B^{(k)} \cos \theta_B^{(k)} + j V_B^{(k)} \sin \theta_B^{(k)} \quad (37)$$

由上述步骤可知,这一等效方法不改变任何 DMS 中的计算步骤和计算结果,只需在 EMS 中采用等效导纳矩阵和等效功率进行输电网潮流计算,因此 AAM 可以采用该方法对环状配电网进行等效处理,进一步提高它的收敛性能。

3 算例分析

本节首先验证了所提方法的准确性,然后针对算法的参数选取进行探讨,最后在含分布式电源、含环状配电网、配网重载等场景下采用本文所提的收敛性指标式(18)分析潮流计算的收敛性,并将已有收敛性提升方法与本文所提方法比较,从而验证本文方法的有效性。实验采用的计算机 CPU 型号为 Intel Core i7-7700,主频 3.60GHz,可用内存 16GB, MATLAB 版本为 R2016b。输电网均采用牛顿拉夫逊法进行潮流计算,收敛精度设为 $1E-6$ p.u., 最大迭代次数设为 50, 初始边界电压大小取 1.0, 相角取 0。本文构造了 A1~A3、B1~B5、C1~C3、D1~D2 共 13 个输配网算例,具体信息见附表 A1。

3.1 算法准确性分析

为验证算法准确性,本文将采用 MSSM 计算得到的结果作为基准,选取 A1、A2、B3 三个算例,比较边界节点的电压、相角、有功和无功。如表 1 所示, AAM 和 MSSM 得到的潮流计算结果一致,说明 AAM 能够保证潮流计算的准确性。

表 1 潮流计算结果比较

算例	电气量	节点	MSSM	AAM
A1	$V_B/\text{p.u.}$	8	1.0046	1.0046
	$\theta_B/^\circ$		-5.2368	-5.2368
	P_B/MW		4.2068	4.2068
	Q_B/MVar		2.8769	2.8769
A2	$V_B/\text{p.u.}$	8	1.0050	1.0050
	$\theta_B/^\circ$		-4.9888	-4.9888
	P_B/MW		2.7068	2.7068
	Q_B/MVar		-1.0404	-1.0404
B3	$V_B/\text{p.u.}$	12	1.0138	1.0138
	$\theta_B/^\circ$		-11.8109	-11.8109
	P_B/MW		10.7782	10.7782
	Q_B/MVar		10.4030	10.4030

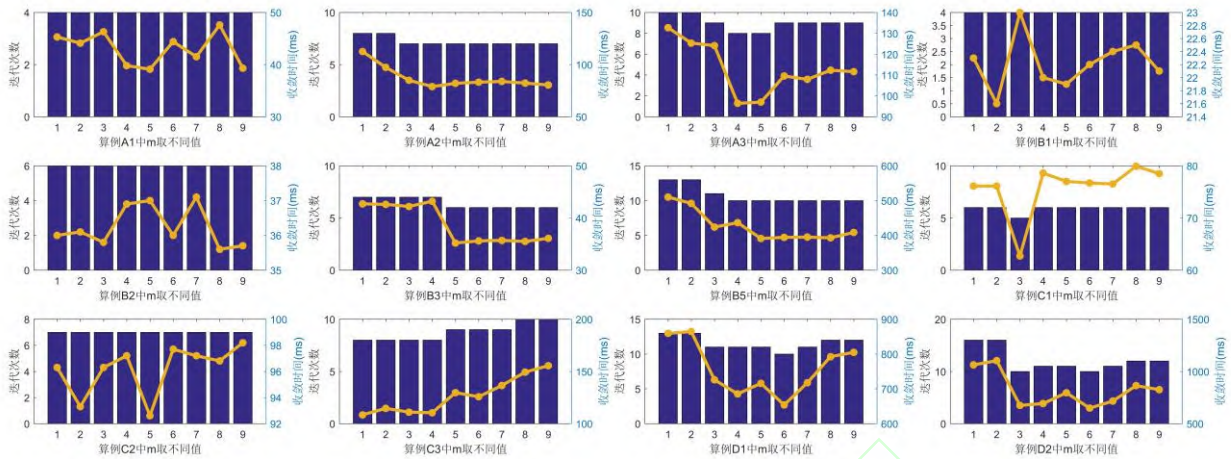


图3 m 取不同值算例的收敛效果

Fig. 3 Convergence under different values of m

3.2 AAM 的参数选取

在应用 AAM 前需要预设参数 m ，它表示 AAM 能利用到前 m 步已有的迭代值， m 取不同的值，AAM 的收敛性能不同。图 3 给出了 m 值从 1 变到 9，在 12 个输配网算例中采用 AAM 计算潮流的收敛情况。其中柱状图表示迭代次数，折线图表示收敛时间，可以发现在 12 张图表中收敛时间一直与迭代次数维持着正相关的关系，这说明 m 的改变主要影响潮流迭代次数，从而影响收敛性能，也就是说 m 对算法本身执行时间的影响相比于对潮流迭代的影响微乎其微。因此在选取参数 m 时，主要目标是使迭代次数最少。在算例 A1、B1、B2、C2 中，迭代次数不会随着 m 的改变而发生改变，说明在迭代次数较小的算例中， m 的改变对收敛效果影响不大。在算例 A2、B3、B5 中，迭代次数随 m 增大而减少，在算例 C3 中，迭代次数随 m 增大而增多，在算例 A3、C1、D1、D2 中，迭代次数随 m 增大先减小后增多。整体而言，在所给算例中， m 取 4~7 是收敛效果相对较好的区间。

不同于其余的算例，算例 B4 在给定的最大迭代次数（50）下无法稳定收敛，因此将最大迭代次数设为 500，研究不同 m 取值对收敛效果的影响。表 2 列出了对应的迭代次数和收敛时间，“ ∞ ”表示在给定的最大迭代次数内潮流无法收敛。根据表 2， m 取 4 时收敛效果最好，但 m 的变化和迭代次数的变化并无规律可循，这说明 m 的取值对于数据的依赖性较高，在不同数据环境下要进行适当的尝试和调整。

表 2 m 取不同值算例 B4 的收敛效果

Tab.2 Comparison of convergence times of each case

m	迭代次数	收敛时间(s)
1	343	56.2
2	343	56.3
3	∞	∞
4	36	3.6
5	85	8.6
6	466	64.6
7	160	16.5
8	∞	∞
9	∞	∞

在实际电网中，输配电网间的交互次数不宜过多，潮流计算一般在有限的次数内应当稳定收敛，因此本文给定的 4~7 这个区间是一个较好的参数 m 的取值范围。在本文的后续实验中，统一取 m 为 4。

3.3 算法收敛性和效率分析

3.3.1 含分布式电源的输配网络

表 3 列出了含分布式电源的输配网络收敛性优化结果。A1 是用作对照的标准输配网络，A2、A3 在配电网中接入了不同数量、不同位置的分布式电源。首先，比较式(18)表示的收敛性指标 r ，可以发现接入分布式电源后 r 明显增大，相应的 MSSM 收敛的迭代次数明显增加，由于 A3 的 r 大于 1，导致算例 A3 采用 MSSM 时无法收敛，验证了接入分布式电源会恶化输配一体化潮流计算的收敛性能。然后，将 AAM 与 MSSM 和文献 [21] 的方法 SIAM 比较，在标准网络 A1 中，三者的迭代次数和收敛时间差别不大，但在 A2 中，

AAM 和 SIAM 大幅减少了迭代次数和收敛时间, 在 A3 中, 由于收敛性恶化, MSSM 发散, AAM 和 SIAM 仍能稳定地以较少的时间和迭代次数收敛。比较 SIAM 和 AAM, 虽然两种方法都能优化潮流计算的收敛性, 但在只含分布式电源的场景下, SIAM 有略微的优势。

表 3 含分布式电源的输配网络收敛性优化结果

Tab.3 Convergence optimization results of transmission and distribution networks with distributed power supply

算例	收敛性指标 r	MSSM		SIAM		AAM	
		迭	迭	迭	迭	迭	迭
		代	收敛时	代	收敛时	代	收敛时
		次	间(ms)	次	间(ms)	次	间(ms)
		数		数		数	
A1	0.0014	4	37.4	4	37.0	4	39.8
A2	0.5913	20	268.1	4	37.4	7	78.9
A3	1.2056	∞	∞	6	69.7	8	96.4

3.3.2 含环状配电网的输配网络

表 4 列出了含环状配电网的输配网络收敛性优化结果。B1 是用作对照的标准输配网络, B2、B3 在 B1 的配网增加支路, 形成含一个环和两个环的配电网^[23], B4、B5 分别在 57 节点和 118 节点的输电网接入多个环状配电网, 研究多个不同环网接入对潮流计算的影响。

比较 B1、B2、B3 的收敛性指标, 可以发现配电网成环使得潮流计算的收敛性恶化, 与 B4、B5 相比, 在输电网中接入多个环状配电网使得收敛性进一步恶化, B4 的收敛性指标远大于 1, B5 的收敛性指标接近 1。采用 MSSM, B4 算例潮流计算发散, B5 算例迭代次数和收敛时间明显增加。而采用本文所提的 AAM 计算, 潮流计算的收敛效果有所改善, B4 由发散至收敛, B5 收敛次数显著减少。但是 AAM 不能消除环网对收敛性的影响, B4 的收敛次数仍然较多, 采用 2.2 节介绍的环网等效法对 AAM 进行改进, 将环路循环功率等效到输电网中, 则环网的影响将被消除, 收敛性能不再受环状配电网存在的影响。

3.3.3 配电网重载的输配网络

为了研究配网重载情况对于潮流计算收敛性能的影响, 选取算例 A1, 改变配网负荷的重载倍数, 观察随着负荷逐渐增加 MSSM 迭代次数的变化趋势, 如图 4 所示, 重载倍数小于 1.9 时, 迭代次数保持在 8 次以下, 重载倍数大于 1.9 时,

表 4 含环状配电网的输配网络收敛性优化结果

Tab.4 Convergence optimization results of transmission and distribution networks with loops in DN

算例	收敛性指标 r	MSSM		AAM		AAM+ 环网等效	
		迭	迭	迭	迭	迭	迭
		代	收敛时	代	收敛时	代	收敛时
		次	间(ms)	次	间(ms)	次	间(ms)
		数		数		数	
B1	2.3918E-4	3	26.6	4	22.0	3	11.4
B2	0.0232	7	43.7	6	36.9	4	16.6
B3	0.0244	7	53.6	7	52.8	4	16.6
B4	5.1201E+6	∞	∞	36	3633.5	5	48.7
B5	0.7874	37	1515.2	10	436.4	5	113.7

迭代次数急剧上升, 到 1.9118 时达到 33 次, 之后再增加负荷, 潮流计算均无法收敛, 这是由于系统负荷超过了临界值, 发生了系统崩溃, 此时无法用收敛性提升方法来使其收敛, 本文选取配网重载倍数为 1.9、1.907、1.908, 对应算例 C2、C3、C4, 来测试收敛性提升的效果。

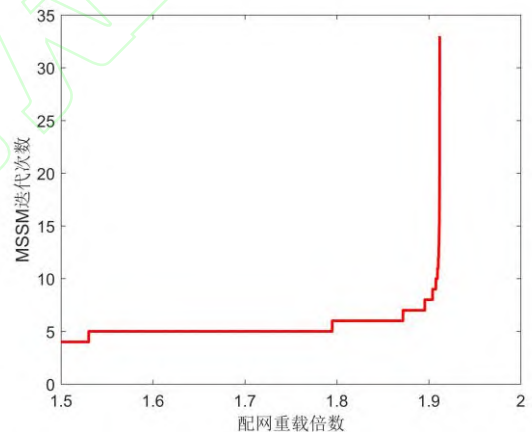


图 4 不同重载情况下的潮流计算迭代次数

Fig. 4 The number of iterations of power flow calculation under different overload conditions

表 5 列出了配电网重载下输配网络潮流计算结果。相比于 MSSM, 文献[20]提出的戴维宁等效法和 AAM 都能改善配网重载下潮流计算的收敛性能, 经优化后两者的迭代次数接近, 但是戴维宁等效法比 AAM 需要耗费更长的数据处理时间, 所以收敛时间略长。此外, 戴维宁等效具有一定的精度误差, 附表 A2 列出了戴维宁等效法的潮流计算结果, 与 MSSM 的计算结果相比, 它的误差最大达 5%左右的。因此, 在配电网重载的场景下, AAM 具有更好的收敛性提升效果。

表 5 配电网重载的输配网络收敛性优化结果

Tab.5 Convergence optimization results of transmission and distribution networks with heavy load in DN

		MSSM		戴维宁等效法		AAM	
算 例	收敛性 指标 r	迭		迭		迭	
		代	收敛时	代	收敛时	代	收敛时
		次	间(ms)	次	间(ms)	次	间(ms)
		数		数		数	
A1	0.0014	4	37.4	4	48.8	4	39.8
C1	0.0272	9	117.7	7	100.0	6	76.3
C2	0.0287	13	211.8	7	123.6	7	97.2
C3	0.0290	22	336.3	7	148.8	8	110.4

3.3.4 大规模输配网络

之前的实验验证了 AAM 能够有效地在各个收敛性恶化的场景下提升输配一体化潮流计算的收敛性能, 为了进一步验证 AAM 的应用价值, 本节构造了两个大规模算例, 将 AAM 与文献[21]提出的 SIAM 进行比较。

表 6 列出了大规模输配网络的对比结果。D1、D2 均采用 300 节点的输电网算例, 并接入了 16 个配电网, 其中既有含分布式电源的配电网, 也有环状配电网。在大规模输配网络中, 用 MSSM 计算潮流均无法收敛, 而采用 AAM 和 SIAM 能够稳定地收敛。这两种方法都对基本的不动点迭代形式做了不同形式的改造, 区别在于 SIAM 采用逐次交叉逼近技术来加速迭代, AAM 采用安德森加速方法来加速迭代, 算例结果表明 AAM 具有更少的迭代次数和更短的收敛时间, 计算效率比 SIAM 提升了约一倍, 因此在大规模输配网络中, 安德森加速具有更好的收敛性优化效果。

表 6 大规模输配网络收敛性优化结果

Tab.6 Convergence optimization results of large-scale integrated transmission and distribution networks

		MSSM		SIAM		AAM	
		迭	收敛	迭		迭	
算 例	收敛性 指标 r	代	时间	代	收敛时	代	收敛时
		次	(ms)	次	间(ms)	次	间(ms)
				数		数	
D1	1.3129	∞	∞	22	1374.7	11	685.3
D2	1.3128	∞	∞	20	1300.0	11	692.1

4 结论

针对电网情况日益复杂, 传统输配一体化潮流计算收敛性逐渐恶化的问题, 本文采用数学中

的不动点理论对潮流计算进行收敛性分析, 提出了反映潮流计算收敛性能的指标。然后, 基于输配一体化潮流计算的迭代本质, 结合迭代加速思想提出潮流计算收敛性提升方法 AAM。实验表明, 根据不动点理论提出的收敛性指标能有效反应潮流计算的收敛性能, AAM 能够在含分布式电源、含环状配电网、配网重载等场景下有效地提升潮流计算的收敛性能。此外, 在大规模的输配网络中, AAM 相较已有方法具有更好的收敛效果, 因而具有较好的实际应用价值和前景。

在后续研究中, 可以考虑将本文的不动点加速这一思路应用到输配一体化状态估计、最优潮流等领域。

参考文献

- [1] 廖胜利, 刘晓娟, 刘本希, 等. 省地县一体化电力调度管理系统分级用户权限方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 88-92.
LIAO Shengli, LIU Xiaojuan, LIU Benxi, et al. Hierarchical user permission scheme in Province-prefecture-county integrated power grid dispatching management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 88-92.
- [2] 郑宗强, 韩冰, 闪鑫, 苏大威, 赵家庆, 徐希. 输配电网高级应用协同运行关键技术分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 122-128.
ZHENG Zongqiang, HAN Bing, SHAN Xin, SU Dawei, ZHAO Jiaqing, XU Xi. Analysis on key technologies of advanced application cooperative operation in transmission and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 122-128.
- [3] 刘东, 张弘, 王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 2-7.
LIU Dong, ZHANG Hong, WANG Jianchun. Review of active distribution network technology[J]. Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 2-7.
- [4] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298(in Chinese).
- [5] 高辉, 徐晴, 欧阳曾恺, 宋乐. 含多类型分布式电源的源网荷协调优化控制策略分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(04): 21-26.
Gao Hui, Xu Qing, Ouyang Zengkai, Song Le. Optimal control strategy analysis of charge coordination in

- source network with multiple types of distributed power supply[J]. Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 21-26.
- [6] 郭清元, 莫超, 吴杰康, 吴帆, 唐惠玲, 陈灵敏. 分布式电源接入的配电系统多类型无功源出力优化方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 211-219.
- Guo Qingyuan, Mo Chao, Wu Jiekang, Wu Fan, Tang Huiling, Chen Lingmin. Multi-type reactive power source output optimization method for distributed power access distribution system [J]. Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 211-219.
- [7] 余佳音, 唐坤杰, 章杜锡, 等. 输配网一体化建模与分析方法研究综述[J]. 浙江电力, 2019, 38(11): 1-9.
- YU Jiayin, TANG Kunjie, ZHANG Duxi, et al. A review of integrated modeling and analysis methods for transmission and distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(11): 1-9.
- [8] 张步涵, 王凯, 方华亮, 毛承雄. 基于网络分割的电力系统潮流分解协调计算[J]. 高电压技术, 2007(7): 173-176.
- ZHANG Buhan, WANG Kai, FANG Hualiang, MAO Chengxiong. Power flow decomposition and coordination calculation based on network segmentation[J]. High Voltage Engineering, 2007(7): 173-176.
- [9] 黄彦全, 肖建, 刘兰, 蒋功连, 韩花荣. 基于支路切割方法的电力系统潮流并行协调算法[J]. 电网技术, 2006(04): 21-25.
- HUANG Yanquan, XIAO Jian, LIU Lan, JIANG Gonglian, HAN Huarong. Parallel power flow coordination algorithm based on branch cutting method[J]. Power System Technology, 2006(04): 21-25.
- [10] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 发输配全局潮流计算——第一部分: 数学模型和基本算法[J]. 电网技术, 1998(12): 41-44+48.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. Global power flow calculation for power generation, transmission and distribution--Part I: mathematical models and basic algorithms[J]. Power System Technology, 1998(12): 41-44+48.
- [11] 孙宏斌, 张伯明, 相年德, 曹冬明. 发输配全局潮流计算第二部分: 收敛性、实用算法和算例[J]. 电网技术, 1999(1): 50-53+58.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande, CAO Dongming. Global power flow calculation of power generation and distribution Part 2: Convergence, practical algorithms and examples [J]. Power System Technology, 1999(01): 50-53+58.
- [12] 孙宏斌, 郭烨, 张伯明. 含环状配电网的输配全局潮流分布式计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 11-15.
- SUN Hongbin, GUO Ye, ZHANG Boming. Distributed calculation of global power flow for transmission and distribution with loop distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 11-15.
- [13] AA Zegers, H Brunner. TSO-DSO interaction: An Overview of current interaction between transmission and distribution system operators and an assessment of their cooperation in Smart Grids [R]. International Smart Grid Action Network, 2014.
- [14] Li Z, Sun H, Guo Q, et al. Generalized Master-Slave-Splitting Method and Application to Transmission-Distribution Coordinated Energy Management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5169-5183.
- [15] HUANG Q H, VITTAL V. Integrated transmission and distribution system power flow and dynamic simulation using mixed three-sequence/three-phase modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3704-3714.
- [16] 李窍盛. 输电网与配电网全网一体化仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- LI Qiaosheng. Simulation study on the integration of transmission network and distribution network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [17] MARINHO J M T, TARANTO G N. A hybrid three-phase single-phase power flow formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23 (3): 1063-1070.
- [18] JAIN H. Dynamic simulation of power systems using three phase integrated transmission and distribution system models case study comparisons with traditional analysis methods[D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2016.
- [19] TANG K, DONG S, MA X, et al. Heterogeneous-decomposition-based coordinated optimization for integrated transmission and distribution networks considering communication conditions[J]. Transmission Distribution IET Generation, 2020, 14(13): 2558-2565.
- [20] Yang J, Yun Z. The Thevenin equivalent based power flow method for integrated transmission and radial distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 10.1016/j.ijepes.2020.106294, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061520302337>.
- [21] TANG K, DONG S, SONG

Y . Successive-Intersection-Approximation-Based Power Flow Method for Integrated Transmission and Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6) : 4836-4846.

[22] 冯果忱. 非线性方程组迭代解法[M]. 上海科学技术出版社, 1989.

FENG Guochen. Iterative method for solving nonlinear equations[M]. Shanghai Science and Technology Press, 1989.

[23] Homer F. Walker, Peng Ni. Iterative Procedures for Nonlinear Integral Equations[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 49(4) : 1715-1735.

[24] Baran, M. E, F. F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1) : 725-734.

[25] Civanlar S , Grainger J J . Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Trans. PWRD, 1988, 3(3): 1217-1223.

附录 A

表 A1 输配网络算例

Table A1 Case of transmission and distribution networks

算例	输电网算例	配电网算例	接有配电网的输电网节点	接有 DG 的配电网节点	配网重载情况
A1	Case57	Case69	8,9,12,18	-	-
A2	Case57	Case69	8,9,12,18	8,15,20(PV)	-
A3	Case57	Case69	8,9,12,18	45,61(PV)	-
B1	Case57	Case16	(8,9,12)	-	-
B2	Case57	Case16A	(8,9,12)	-	-
B3	Case57	Case16B	(8,9,12)	-	-
B4	Case57	Case16A	(2,3,6)	-	-
		Case16B	(8,9,12),(25,26,30)		
B5	Case118	Case16A	(2,4,5),(10,15,20),(22,24,25),(33,45,66)	-	-
		Case16B	(70,72,78),(85,90,100),(105,108,109),(111,115,118)		
C1	Case57	Case69	8,9,12,18	-	配网负荷*1.9
C2	Case57	Case69	8,9,12,18	-	原负荷*1.907
C3	Case57	Case69	8,9,12,18	-	原负荷*1.908
D1	Case300	Case69	2,144	-	-
		Case69	4,19,25,167,189,192	45,61(PV)	
		Case16	(38,45,50),(200,205,210)	-	
		Case16A	(66,80,90),(211,233,234)	-	
		Case16B	(100,101,102),(120,130,140),(238,239,240),(242,244,250)	6,12,15(PV)	
D2	Case300	Case69	2,144	-	-
		Case69	167,189	8,15,20(PV)	
		Case69	4,19,25,192	45,61(PV)	
		Case16	(38,45,50),(200,205,210)	-	
		Case16A	(66,80,90),(211,233,234)	-	
		Case16B	(100,101,102),(120,130,140),(238,239,240),(242,244,250)	6,12,15(PV)	

说明:

1) 输电网算例均取 MATPOWER 中的标准算例, Case69 和 Case16 来自于文献[24]和文献[25], Case16A 和 Case16B 分别表示含一个环和两个环的 16 节点配电网, 也取自文献[25]。

2) 连接边界节点和输电网的变压器支路的阻抗取 $0.002+j0.01\text{p.u.}$ (归算到高压侧), 并联导纳为 0。

3) 接入配电网的分布式电源功率为 0.5MW, 有功上下限为 16MW 和 0MW, 无功上下限为 20MVar 和 -20MVar。

表 A2 戴维宁等效法潮流计算结果

Tab A2 Power flow calculation results of Thevenin equivalent method

算例	电气量	节点	MSSM	戴维宁等效法	误差/%
A1	$V_B/\text{p.u.}$	8	1.0046	1.0046	0
	$\theta_B/^\circ$		-5.2368	-5.2331	0.07
	P_B/MW		4.2068	4.1888	0.43
	Q_B/MVar		2.8769	2.8681	0.10
C1	$V_B/\text{p.u.}$	8	1.0042	1.0042	0
	$\theta_B/^\circ$		-6.3270	-6.1779	2.36
	P_B/MW		9.8664	9.2890	5.85
	Q_B/MVar		6.2754	6.0286	3.93
C2	$V_B/\text{p.u.}$	8	1.0042	1.0042	0
	$\theta_B/^\circ$		-6.3542	-6.1882	2.61
	P_B/MW		9.9420	9.3413	6.04
	Q_B/MVar		6.3152	6.0586	4.06
C3	$V_B/\text{p.u.}$	8	1.0042	1.0042	0
	$\theta_B/^\circ$		-6.3609	-6.1896	2.69
	P_B/MW		9.9529	9.3488	6.07
	Q_B/MVar		6.3209	6.0629	4.08



陈一丰

作者简介:

陈一丰(1997),男,硕士研究生,研究方向为输配协同优化调度, cyf97@zju.edu.cn;

唐坤杰(1994),男,博士研究生,研究方向为输配协同优化调度, tangkunjie1994@zju.edu.cn;

*通信作者:董树锋(1982),男,博士,副教授,主要研究方向为智能电网优化与控制技术, dongshufeng@zju.edu.cn;

宋永华(1964),男,博士,教授,研究方向为智能电网运行与优化。

(责任编辑 李小丫)