

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230064

中压不接地配电网三相潮流新方法

张逸¹, 林金榕¹, 李传栋², 邵振国¹, 蓝天¹, 陈书畅¹

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司
电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 在大量分布式电源接入中低压配电网的新形势下, 三相潮流计算是分析其影响的基本手段。针对现有中压不接地配电网三相潮流研究主要采用人为设置参考中性点/零序电压的方式, 导致无法仿真分析中性点/零序电压偏移、不接地网络零序潮流和相-地电压不平衡等情况, 提出一种中压不接地配电网三相潮流新算法。首先, 提出不接地配电网三相潮流在节点变量和导纳矩阵方面的特殊性。然后, 设计基于功率平衡方程和牛拉法, 采用导纳矩阵可逆化处理和矩阵替换技术实现约束零序电流为零的不接地配电网三相潮流算法。最后, 基于6节点系统和修改的IEEE123算例仿真不接地配网的潮流, 结合PSCAD验证所提方法在不同场景下的准确性以及在大电网中的适用性和收敛性, 并在地市电网中进行实际应用。算例分析表明, 所提算法计算结果准确, 具有良好的工程实用性。
关键词: 三相潮流; 配电网; 不接地网络; 牛顿-拉夫逊法

A method for three-phase power flow in a medium-voltage ungrounded distribution network

ZHANG Yi¹, LIN Jinrong¹, LI Chuandong², SHAO Zhenguo¹, LAN Tian¹, CHEN Shuchang¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

Abstract: With a large amount of distributed generation connected to the medium and low voltage distribution network, three-phase power flow calculation is the basic means to analyze their influence. The existing research on three-phase power flow for a medium-voltage ungrounded distribution network mainly adopts the method of manually setting the reference neutral point or zero-sequence voltage. This makes it difficult to simulate and analyze the neutral point or zero-sequence voltage offset, and the zero-sequence power flow and the imbalance of phase to ground voltage. Thus this paper proposes a new three-phase power flow algorithm for a medium-voltage ungrounded distribution network. First, the particularity of three-phase power flow for this network in terms of node variables and admittance matrix is analyzed. Second, based on a power balance equation and the Newton-Raphson method, a three-phase power flow algorithm for an ungrounded distribution network with constrained zero-sequence current is designed by using admittance matrix reversible processing and matrix replacement technology. Finally, the power flow for the ungrounded distribution network is simulated based on the 6-bus system and the modified IEEE123 test case. The accuracy of the proposed method in different scenarios and its applicability and convergence in large power grids are verified by PSCAD, and a practical application is carried out in local power grids. The example analysis shows that the proposed algorithm gives accurate calculation results and good engineering practicability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777035).

Key words: three-phase power flow; distribution network; ungrounded network; Newton-Raphson method

0 引言

目前, 大量分布式新能源接入中低压配电网, 其运行和控制均面临重大挑战^[1-5]。例如: 受到环境、

人为等因素的影响, 新能源接入呈现较大的波动性和随机性, 且大量剩余功率形成逆向潮流, 通过低压配网馈入中压配网, 易引起中压配网的电压越限^[6-7]、三相不平衡^[8-9]、失稳^[10-11]和其他电能质量问题^[12-13]等。因此, 作为分析以上问题的基本手段, 研究如何准确地计算中压配电网的三相潮流具有重要意义。

我国 110 kV 及以上电网一般采用中性点有效

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777035); 福建省自然科学基金项目资助(2020J01123)

接地方式,包括中性点直接接地和经低阻接地;6~35 kV 配电网一般采用非有效接地方式,包括中性点不接地、经高阻和消弧线圈接地等^[14]。中性点有效和非有效接地方式的主要差别在于零序回路和中性点电压。目前,配电网三相潮流研究主要针对有效接地方式^[15-18],而对非有效接地情况研究较少^[19-26]。不接地电网由于零序分量的自然约束,存在网络导纳矩阵奇异、潮流变量自由度(degree of freedom, DOF)降阶的情况,使得其三相潮流仿真比接地系统的更为困难和复杂。

针对不接地网络,现有相关研究均基于一定的假设和模型简化。在元件模型方面,文献[19]认为由于没有参考中性点电压,相对地电压没有实际意义,使用线电压表示变压器不接地绕组的电压,解决导纳矩阵奇异问题。文献[20]通过增广导纳矩阵的方法,对变压器不接地绕组添加零序电压为任意值的约束方程,解决导纳矩阵奇异问题。文献[21]摒弃 Kron 基础上的模型框架,基于端口的 $I-f(U)$ 关系构建考虑中性点的元件模型,实现对接地点接地阻抗的考虑。文献[22-23]认为不接地网络的相-地或相-中性点电压不可控,使用线电压为控制对象构建不接地电源模型。在潮流计算方面,文献[24]基于各节点零序电压和零序电流为零的假设,忽略零序分量的影响,通过正负序分量之间的关系,利用正序潮流反推负序潮流,避免了零序潮流计算问题。文献[25]以相-中性点电压为变量,通过将各节点的两个功率方程替换为零序电流为零的约束方程,较好地解决了潮流变量的 DOF 问题。文献[26]在文献[21]的基础上,基于注入电流方程的牛顿-拉夫逊算法计算考虑接地阻抗的潮流,但模型需要考虑接线的不同结构,处理复杂,难以统一,且引入中性点变量导致矩阵维数增加。值得注意的是,现有研究均须设定网络的参考中性点电压或零序电压,由于实际网络的中性点/零序电压未知,采用人为设定的方式强制将零序潮流和正/负序潮流进行解耦,使潮流仿真失去意义。然而,由于实际不接地电网中广泛存在着线路等参数不对称造成的中性点/零序电压偏移和相对地电压不平衡的情况,偏移程度受网络参数影响,现有方法均无法有效分析相应情况。

针对上述问题,本文基于导纳矩阵可逆处理和矩阵替换技术实现不接地配电网三相潮流的精确计算。首先,基于不接地配电网特点,提出潮流变量存在的自由度问题和模型奇异问题;然后,基于功率平衡方程和牛拉法,运用导纳矩阵可逆处理和矩阵替换技术,考虑不接地网络零序电流为零的约束,构建中压不接地配电网的三相潮流新算法;

最后,在 6 节点和修改的 IEEE123 节点系统上,利用文献[20]所提方法仿真参数不平衡下的潮流,设置不同场景并结合 PSCAD 对比分析了本文方法的有效性和准确性,以及在大电网中的适用性和收敛性,并在地市电网中进行实际应用。

1 不接地配电网潮流分析

1.1 节点变量

传统接地网络的三相潮流,网络中各节点拥有 12 个变量,已知 6 个,待求 6 个。例如, PQ 节点已知的是三相的有功功率和无功功率,待求的是三相电压的实部和虚部,满足如式(1)所示方程组。

$$\begin{cases} P_{abc} = U_{abcx}(\mathbf{G}_{abc}U_{abcx} - \mathbf{B}_{abc}U_{abcy}) + U_{abcy}(\mathbf{G}_{abc}U_{abcy} + \mathbf{B}_{abc}U_{abcx}) \\ Q_{abc} = U_{abcy}(\mathbf{G}_{abc}U_{abcx} - \mathbf{B}_{abc}U_{abcy}) - U_{abcx}(\mathbf{G}_{abc}U_{abcy} + \mathbf{B}_{abc}U_{abcx}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{abc} 为三相有功功率; Q_{abc} 为三相无功功率; \mathbf{G}_{abc} 为节点的三相电导矩阵; \mathbf{B}_{abc} 为节点的三相电纳矩阵; U_{abcx} 为节点的三相电压实部; U_{abcy} 为节点的三相电压虚部。

在不接地网络中,零序电流存在自然约束。如图 1 所示,当网络中新增存在注入功率的 PQ 节点时,由于新增节点自然存在的零序电流约束,导致网络隐含 2 个平衡方程,结合应满足的 6 个功率平衡方程,此时网络新增 6 个变量,8 个方程,即此时 6 个潮流变量之间不再独立,变量 DOF 降阶。PV 节点类似。图中: P_{abc}^{θ} 为节点 θ 的三相有功功率; Q_{abc}^{θ} 为节点 θ 的三相无功功率。

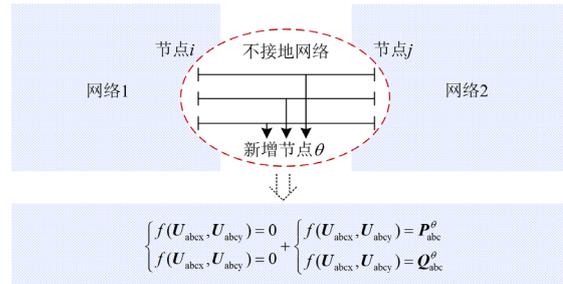


图 1 不接地网络的零序约束

Fig. 1 Ungrounded network zero-sequence constraint

值得注意的是,在不接地网络中若引入中性点电压作为潮流方程变量,虽然可以使网络新增的变量和方程相互匹配,但是需要假设不接地网络的全网参考中性点电压,然而实际不接地网络的中性点电压是未知的。

1.2 变压器导纳矩阵

参考文献[27]建立的三相变压器模型,以 YN_y 变压器模型为例进行说明,相应的导纳矩阵如式

(2)一式(4)所示。

$$\mathbf{Y}_T = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{ff} & \mathbf{Y}_{ft} \\ \mathbf{Y}_{tf} & \mathbf{Y}_{tt} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}_{ff} = \mathbf{Y}_{tt} = \frac{1}{3k^2} \begin{bmatrix} 2y_1 & -y_1 & -y_1 \\ -y_1 & 2y_1 & -y_1 \\ -y_1 & -y_1 & 2y_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_{ft} = \mathbf{Y}_{tf} = -\frac{1}{3k^2} \begin{bmatrix} 2y_1 & -y_1 & -y_1 \\ -y_1 & 2y_1 & -y_1 \\ -y_1 & -y_1 & 2y_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： \mathbf{Y}_T 为三相变压器导纳矩阵； y_1 为三相变压器的正序导纳； k 为三相变压器的变比。

从式(2)一式(4)可判断具有不接地绕组的 YNy 变压器的导纳矩阵和其子矩阵均是奇异的，导致不接地网络的三相潮流存在收敛性问题。

2 算法实现过程

一方面，现有方法均需要假设不接地网络的全网参考中性点/零序电压，然而实际不接地网络的中性点/零序电压是未知的；另一方面，若采用相-中性点电压或线电压作为变量，则难以有效分析相-地电压的不平衡情况。为此，本文采用的是相-地电压和相-地功率模型，由于存在零序回路和相间回路的耦合，因而不能采用现有的处理方式，需要重新进行设计和推导。

2.1 变压器导纳矩阵处理

由 1.2 节分析可知，具有不接地绕组的变压器导纳矩阵是奇异的。继续以 YNy 变压器为例，提取导纳矩阵的子矩阵 \mathbf{Y}_{ff} 和 \mathbf{Y}_{tt} ，从中选取不可逆的矩阵在其主对角元素加上数值 α ，如式(5)所示。物理上，这种处理方式相当于对变压器模型添加对地的励磁回路；数学上，变压器导纳矩阵成为严格对角占优的矩阵，保证了矩阵的可逆性。

$$\mathbf{Y}_{ff} = \mathbf{Y}_{tt} = \frac{1}{3k^2} \begin{bmatrix} 2y_1 + \alpha & -y_1 & -y_1 \\ -y_1 & 2y_1 + \alpha & -y_1 \\ -y_1 & -y_1 & 2y_1 + \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 零序约束方式

在计算不接地网络潮流时，本文利用节点的零序电流约束方程替换任意 2 个功率方程约束，使潮流方程数等于变量数。由于变压器模型已隐含三相电流之和为零，为此本文仅对负荷采取约束处理。以 PQ 负荷为例，本文将负荷节点的 B、C 相无功功率方程替换为对应节点零序电流为零的约束方程。此时，虽然放松了 2 个功率方程约束，但若给定的负荷功率符合实际情况，结果并不受影响。具

体原因是，6 个功率平衡方程和零序电流约束方程本质上是个超定相容方程组，若考虑计及节点的全部方程将使雅可比矩阵欠秩，所以需要替换任意 2 个功率方程为零序电流约束方程，使变量数等于方程数。在上述处理后，若给定的功率满足实际情况，且雅可比矩阵不为病态矩阵，则得到的潮流结果也能使被替换的 2 个功率方程成立。另外，此处替换的潮流方程不限于 B、C 相无功功率方程。若计及 PV 节点，方法同上。但是需要注意的是，在面对 PV 节点越限时，需要将 PV 节点转化为 PQ 节点，保持节点的无功功率为限值，节点的潮流方程变为三相有功功率平衡方程、三相无功功率之和等于限值的平衡方程和零序电流等于零的约束方程，方程数仍等于变量数。

2.3 具体过程

牛顿法是一种常用求解非线性方程的方法，已被广泛地应用于三相潮流计算^[16,19]。其中，基于功率平衡方程的牛-拉法潮流可方便将不同网络进行联合仿真。因此，本文基于功率平衡方程设计不接地配电网三相潮流，具体实现流程如下所示。

牛-拉法潮流的基础方程如式(6)所示。

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}\Delta\mathbf{x} \quad (6)$$

式中： \mathbf{F} 为注入功率变化量； \mathbf{J} 为雅可比矩阵； $\Delta\mathbf{x}$ 为三相电压变化量。

添加节点的零序电流实部与虚部为零的约束方程，公式推导如式(7)所示。

$$\begin{cases} 3\mathbf{I}_{0x} = \mathbf{I}_{ax} + \mathbf{I}_{bx} + \mathbf{I}_{cx} \\ 3\mathbf{I}_{0y} = \mathbf{I}_{ay} + \mathbf{I}_{by} + \mathbf{I}_{cy} \end{cases} \quad (7)$$

式中： \mathbf{I}_{0x} 为零序电流实部； \mathbf{I}_{0y} 为零序电流虚部； \mathbf{I}_{px} 为 p 相电流实部， $p = \{a, b, c\}$ ； \mathbf{I}_{py} 为 p 相电流虚部。

由式(7)进一步可得

$$\begin{cases} 3\mathbf{I}_{0x} = (\mathbf{Y}_{ax} + \mathbf{Y}_{bx} + \mathbf{Y}_{cx})\mathbf{U}_{abcx} - (\mathbf{Y}_{ay} + \mathbf{Y}_{by} + \mathbf{Y}_{cy})\mathbf{U}_{abcy} \\ 3\mathbf{I}_{0y} = (\mathbf{Y}_{ax} + \mathbf{Y}_{bx} + \mathbf{Y}_{cx})\mathbf{U}_{abcy} + (\mathbf{Y}_{ay} + \mathbf{Y}_{by} + \mathbf{Y}_{cy})\mathbf{U}_{abcx} \end{cases} \quad (8)$$

式中， \mathbf{Y}_{px} 和 \mathbf{Y}_{py} 分别为三相导纳矩阵 \mathbf{Y} 的子矩阵 \mathbf{Y}_p 的实部和虚部， \mathbf{Y}_p 的形式如式(9)所示。

$$\mathbf{Y}_p = \begin{cases} \Delta \\ \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{1,1} & \mathbf{Y}_p^{1,2} & \cdots & \mathbf{Y}_p^{1,\Omega} \\ \mathbf{Y}_p^{2,1} & \mathbf{Y}_p^{2,2} & \cdots & \mathbf{Y}_p^{2,\Omega} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_p^{\Omega,1} & \mathbf{Y}_p^{\Omega,2} & \cdots & \mathbf{Y}_p^{\Omega,\Omega} \end{bmatrix} \\ \Delta \\ \mathbf{Y}_p^{i,j} = \begin{bmatrix} y_{pa}^{i,j} & y_{pb}^{i,j} & y_{pc}^{i,j} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Y^{1,\Omega}$ 为节点 1 对节点 Ω 的互导纳, 是 3×3 维矩阵, 其他同理; $y_{pb}^{i,j}$ 为节点 i 与 j 间 p 相和 b 相的互导纳, 其他同理; Ω 为节点总数。

为添加零序电流约束, 需要改进牛-拉法的相应矩阵: 利用节点的零序电流变化量替换原矩阵中对应节点的 B 相、C 相无功变化量, 如式(10)所示, 其中零序电流变化量由式(11)得到; 利用负荷节点的零序电流偏导矩阵替换原矩阵中对应节点的 B、C 相无功偏导矩阵, 得到式(12)。

$$F = \begin{bmatrix} \Delta P_{abc} \\ \Delta Q_{abc} \\ \Delta Q_a \\ (U_{abc}^{\text{set}})^2 - U_{abcx}^2 - U_{abcy}^2 \\ \Delta I_{0x} \\ \Delta I_{0y} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{0x} = I_{0x}^{\text{set}} - I_{0x} \\ \Delta I_{0y} = I_{0y}^{\text{set}} - I_{0y} \end{cases} \quad (11)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_{abc}}{\partial U_{abcx}} & \frac{\partial \Delta Q_{abc}}{\partial U_{abcx}} & \frac{\partial \Delta Q_a}{\partial U_{abcx}} & \frac{\partial \Delta U_{abc}^2}{\partial U_{abcx}} & \frac{\partial \Delta I_{0x}}{\partial U_{abcx}} & \frac{\partial \Delta I_{0y}}{\partial U_{abcx}} \\ \frac{\partial \Delta P_{abc}}{\partial U_{abcy}} & \frac{\partial \Delta Q_{abc}}{\partial U_{abcy}} & \frac{\partial \Delta Q_a}{\partial U_{abcy}} & \frac{\partial \Delta U_{abc}^2}{\partial U_{abcy}} & \frac{\partial \Delta I_{0x}}{\partial U_{abcy}} & \frac{\partial \Delta I_{0y}}{\partial U_{abcy}} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

式中: ΔP_{abc} 为三相有功功率变化量; ΔQ_{abc} 为三相无功功率变化量; ΔQ_a 为 A 相无功功率变化量; ΔI_{0x} 为节点零序电流实部变化量; ΔI_{0y} 为节点零序电流虚部变化量; U_{abc}^{set} 为 PV 节点给定的电压值; I_{0x}^{set} 和 I_{0y}^{set} 分别为给定的节点零序电流的实部和虚部, 本文取 0。

限于篇幅, 式(12)中雅可比矩阵的常规偏导矩阵生成公式参考文献[28], 与零序电流相关的偏导矩阵元素按式(13)生成。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta I_{0x}}{\partial U_{abcx}} = -Y_{ax} - Y_{bx} - Y_{cx} \\ \frac{\partial \Delta I_{0x}}{\partial U_{abcy}} = Y_{ay} + Y_{by} + Y_{cy} \\ \frac{\partial \Delta I_{0y}}{\partial U_{abcx}} = -Y_{ax} - Y_{bx} - Y_{cx} \\ \frac{\partial \Delta I_{0y}}{\partial U_{abcy}} = Y_{ay} + Y_{by} + Y_{cy} \end{cases} \quad (13)$$

通过上述处理后, 传统牛-拉法潮流可以适用于不接地配电网的三相潮流计算。

3 算例分析

3.1 算例说明

本文采用 3 个网架进行验证, 分别如下。

1) 6 节点系统

该系统较全面地体现了高、中和低压配网的基本结构。利用此系统, 本文设置以下 4 个小算例进行验证说明: (1) 利用 PSCAD 分析网络参数变化时的零序潮流, 详见 3.2 节; (2) 利用现有方法^[20]仿真对地参数不平衡下的潮流, 详见 3.3 节; (3) 分析变压器模型添加小导纳数值对潮流结果的影响, 详见 3.4 节; (4) 对比 PSCAD 分析本文方法的有效性和准确性, 详见 3.5 节。

2) 修改的 IEEE123 系统

对原 IEEE123 系统进行修改, 以构造不接地网络。利用此系统, 分析本文方法在大电网下的适用性和收敛性, 详见 3.6 节。

3) 某市不接地系统

该系统长期遭受严重的电压三相不平衡困扰, 利用此系统, 分析本文方法在实际工程中的适用性, 详见 3.7 节。

程序实现软件: Matlab 9.4, 硬件: CPU inter(R) Core(TM) i5-8400H。

3.2 零序潮流分析

当不接地网络为非平衡情况时, 网络参数将容易影响中性点/零序电压偏移和相-地电压不平衡程度。为了分析上述影响程度, 基于图 2 所示的 6 节点系统, 假设节点 5 的 C 相为位置 I, 节点 3 的 B 相为位置 II, 分别在这两个位置添加不同的对地电容, 利用 PSCAD 分析零序潮流和相-地电压, 得到的零序分量结果如表 1 所示, 节点 3 和节点 5 的三相电压如图 3 所示, 图 3 中的电容配置情况对应表 4。其中, 6 节点系统的参数如表 2—表 4 所示。

从表 1 和图 3 可见, 当不接地网络的参数发生变化时, 中性点/零序电压和相-地电压的变化幅度大。在这种情况下, 人为设定参考中性点/零序电压的方式将失去意义, 需要一种能够有效分析零序潮流的方法。



图 2 6 节点系统

Fig. 2 Six-node system

表 1 不同电容配置时的零序分量结果

Table 1 Zero-sequence component results for different capacitor configurations

配置名称	电容/ μF		节点零序电压幅值/kV		支路零序电流幅值/A	
	位置 I	位置 II	节点 3	节点 5	支路 3-4	支路 4-5
配置 1	—	—	10^{-8}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-10}
配置 2	0.01	—	0.097	0.097	10^{-8}	10^{-3}
配置 3	0.02	—	0.192	0.194	10^{-8}	10^{-3}
配置 4	0.04	—	0.372	0.374	10^{-8}	10^{-2}
配置 5	0.01	0.01	0.093	0.093	10^{-3}	10^{-3}
配置 6	0.02	0.01	0.159	0.158	10^{-3}	10^{-3}
配置 7	0.04	0.01	0.326	0.325	10^{-3}	10^{-2}

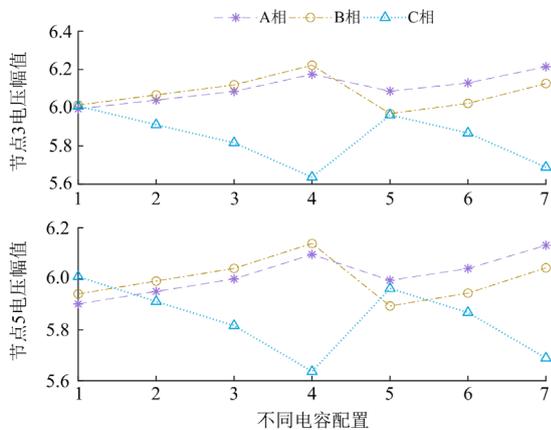


图 3 不同电容配置时的三相电压结果

Fig. 3 Three-phase voltage results for different capacitor configurations

表 2 变压器参数

Table 2 Transformer parameters

绕组接法	变比	短路电压/%	短路损耗/kW	容量/kVA
YNd11	35/10.5	7.4	40.1	6300
Dyn11	10.5/0.4	5.7	10.3	1000

表 3 负荷参数

Table 3 Load parameters

接入节点	A 相负荷/kVA	B 相负荷/kVA	C 相负荷/kVA
4	112+j69	113+j4	171+j34
6	180+j60	120+j30	160+j40

表 4 线路参数

Table 4 Line parameters

支路	电阻/ Ω	电抗/ Ω	对地电容/ μF
1-2	5.4	7.58	0
3-4	2.7	3.35	0
4-5	2.7	3.35	0.1

3.3 现有方法适用性分析

为了说明现有文献采用人为设定参考中性点/零序电压的方式不适用于分析不接地网络中因参数不平衡造成中性点/零序电压偏移和相-地电压不平衡情况, 本文采用文献[20]所述方法, 在图 2 所示网架的基础上, 去除支路 4-5 和节点 4 的负荷, 在节点 3 添加不平衡的对地电纳, 通过对不接地网络设置不同的参考零序电压, 得到的节点 3 的三相电压结果如表 5 所示。

表 5 不同对地电纳时节点 3 的三相电压

Table 5 Three-phase voltage of node 3 with different ground susceptance to ground

对地电容参数/ μF	参考零序电压/p.u.	三相电压结果/p.u.		
		A	B	C
A: 0.05	0.00	$0.97 \angle -33.6^\circ$	$0.97 \angle -150.9^\circ$	$0.98 \angle 88.9^\circ$
B: 0.03	0.05	$0.99 \angle -30.8^\circ$	$0.96 \angle -150.4^\circ$	$0.98 \angle 87.9^\circ$
C: 0.07	0.10	$1.01 \angle -30.3^\circ$	$0.94 \angle -149.9^\circ$	$0.99 \angle 87.0^\circ$
A: 0.05	0.00	$0.97 \angle -31.3^\circ$	$0.98 \angle -150.9^\circ$	$0.98 \angle 88.9^\circ$
B: 0.05	0.05	$0.99 \angle -30.8^\circ$	$0.96 \angle -150.4^\circ$	$0.98 \angle 87.9^\circ$
C: 0.05	0.10	$1.01 \angle -30.3^\circ$	$0.95 \angle -149.9^\circ$	$0.99 \angle 87.0^\circ$

从表 5 可见, 在不接地网络存在对地参数不平衡时, 不同参考零序电压所得的电压结果存在较大不同, 造成该方式难以分析因线路等不平衡造成的中性点/零序电压偏移和相-地电压不平衡情况。

3.4 对地小导纳敏感度分析

为了分析本文对变压器模型处理的有效性, 基于图 2 所示的网架对 2.1 节所述的数值 α 进行调整, 得到节点 5 的 A 相电压结果, 如表 6 所示。算法收敛精度取 10^{-10} p.u., 基准功率取 100 MVA。

表 6 α 变化时的节点 5 的 A 相电压

Table 6 Phase A voltage of node 5 when α changes

数值 α /p.u.	节点 5 的 A 相电压/p.u.	迭代次数
10^{-9}	$0.9644 \angle -33.57^\circ$	3
10^{-8}	$0.9644 \angle -33.57^\circ$	3
10^{-7}	$0.9644 \angle -33.57^\circ$	3
10^{-6}	$0.9644 \angle -33.57^\circ$	3
10^{-5}	$0.9645 \angle -33.56^\circ$	3
10^{-4}	$0.9652 \angle -33.55^\circ$	3
10^{-3}	$0.9739 \angle -33.60^\circ$	3

可见, 当 α 取 $10^{-9} \sim 10^{-6}$ p.u. 时, 对潮流结果影响微小, 因此本文 α 取 10^{-7} p.u.。

3.5 对比分析

不接地网络和接地网络对零序分量而言, 是两个独立的网络。考虑到本文算法对不接地网络添加额外约束, 可能会对不接地网络和接地网络的潮流结果造成影响。为了将不接地与接地网络区别分析,

基于图 2 所示的 6 节点系统, 设置以下两种场景, 场景 1: 接地网络不平衡场景, 即仅接地网络中存在不平衡情况, 体现为接入节点 6 的负荷存在三相不平衡; 场景 2: 不接地网络不平衡场景, 即仅不接地网络中存在不平衡情况, 体现为网络参数和负荷不平衡场景。

1) 场景 1

采用图 2 所示的 6 节点系统, 并平衡节点 4 的负荷, 采用本文方法计算三相潮流, 将结果与 PSCAD 进行对比。另外添加对不接地网络全部节点进行零序电流约束的方式(即方式①), 用以辅助说明不接地网络的 DOF 问题。由于利用零序分量约束方程替换节点的 B 相、C 相无功潮流方程, 这些节点的无功功率是不受约束的, 导致结果可能与实际存在偏差。为此, 本文列出无功功率结果, 限于篇幅, 本文仅展示非零的无功功率和零序分量。

场景 1 下各计算方式电压结果对比如图 4 所示, 各计算方式下无功功率结果对比如图 5 所示, 零序分量结果如表 7 所示。功率的正号表示注入, 负号表示流出, 支路电流 6-5 表示从节点 6 向节点 5 流动的电流, 其他同理。图中上侧的数字为相应方法与 PSCAD 的结果偏差, 箭头向上表示数值的绝对值大于 PSCAD 结果, 箭头向下相反。

从图 4 可见, 本文方式和方式①结果一致, 与 PSCAD 计算的三相电压幅值最大相对偏差(下文简记为幅值偏差)为 0.07%, 相角最大相对偏差(下文简记为相角偏差)为 0.03°, 均在合理范围内, 从而验证了算法在此场景下的有效性与准确性。从图 5 可

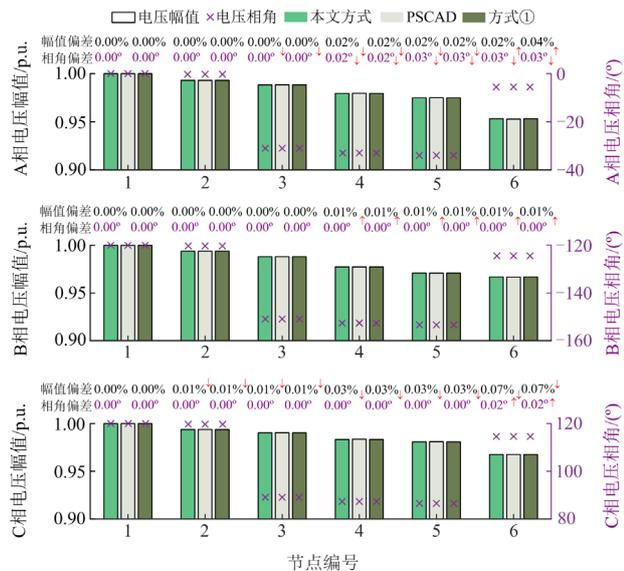


图 4 场景 1 下各计算方式电压结果对比

Fig. 4 Comparison of voltage results of different methods in scenario 1

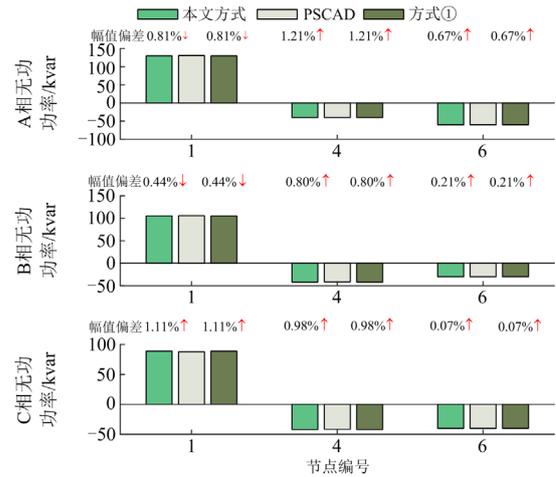


图 5 场景 1 下各计算方式无功功率结果对比

Fig. 5 Comparison of reactive power results of different methods in scenario 1

表 7 场景 1 下零序分量情况

Table 7 Zero-sequence component in scenario 1

方式	p.u.	
	节点零序电压幅值	支路零序电流幅值
	节点 6	支路 6-5
本文方式	0.003 177	0.000 548
PSCAD	0.003 183	0.000 550
方式①	0.003 177	0.000 548

见, 虽然替换了负荷节点的 B 相、C 相无功功率方程, 但是无功结果并不受影响。

从表 7 可知, 本文方式与方式①的零序分量结果一致, 与 PSCAD 计算得到的节点零序电压幅值偏差为 0.19%, 支路电流幅值偏差为 0.36%, 误差在合理范围。从结果可见, Dyn11 变压器的不接地绕组(节点 5)隔离了零序电流, 使零序电流仅出现在接地网络侧(支路 6-5), 此零序电流又产生零序电压。

上述分析表明, 在此场景下, 本文方法与 PSCAD 的潮流结果一致, 误差在合理范围内。

2) 场景 2

本节分析不接地网络中存在网络参数和负荷不平衡时的情况, 并假设线路 3-4 的支路参数和节点 4 的对地电容参数不平衡。其中, 节点 4 的 B 相存在 0.01 μF 电容, 支路 3-4 的不平衡参数如式(14)所示。为减少无关因素影响, 将接入节点 6 的负荷改为平衡负荷。

$$\mathbf{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} 5.65 \angle 78.97^\circ & 1.95 \angle 83.57^\circ & 1.65 \angle 86.15^\circ \\ 1.95 \angle 83.57^\circ & 5.81 \angle 80.97^\circ & 2.06 \angle 85.84^\circ \\ 1.65 \angle 86.15^\circ & 2.06 \angle 85.84^\circ & 5.95 \angle 79.29^\circ \end{bmatrix} \quad (14)$$

所得电压结果如表 8 所示，无功功率结果如图 6 所示，零序分量结果如表 9 所示。

表 8 场景 2 下各计算方式电压结果对比

Table 8 Comparison of voltage results of different calculation methods in scenario 2

节点	相位	本文方式	PSCAD	方式①
1	A	1.0000∠0.0°	1.0000∠0.0°	1.0000∠0.0°
	B	1.0000∠-120.0°	1.0000∠-120.0°	1.0000∠-120.0°
	C	1.0000∠120.0°	1.0000∠120.0°	1.0000∠120.0°
2	A	0.9949∠-0.2°	0.9950∠-0.2°	0.9949∠-0.2°
	B	0.9947∠-120.3°	0.9947∠-120.3°	0.9947∠-120.3°
	C	0.9936∠119.8°	0.9937∠119.8°	0.9936∠119.8°
3	A	0.9975∠-30.0°	0.9976∠-30.0°	0.9975∠-30.0°
	B	0.9768∠-150.7°	0.9770∠-150.7°	0.9768∠-150.7°
	C	0.9964∠88.3°	0.9963∠88.3°	0.9964∠88.3°
4	A	0.9827∠-31.5°	0.9831∠-31.4°	0.9827∠-31.5°
	B	0.9704∠-152.3°	0.9703∠-152.2°	0.9704∠-152.3°
	C	0.9897∠86.2°	0.9900∠86.3°	0.9897∠86.2°
5	A	0.9778∠-32.4°	0.9781∠-32.3°	0.9778∠-32.4°
	B	0.9657∠-153.2°	0.9655∠-153.1°	0.9657∠-153.2°
	C	0.9855∠85.3°	0.9858∠85.5°	0.9855∠85.3°
6	A	0.9628∠-4.5°	0.9629∠-4.4°	0.9628∠-4.5°
	B	0.9700∠-125.1°	0.9698∠-125.0°	0.9700∠-125.1°
	C	0.9571∠114.8°	0.9572∠114.9°	0.9571∠114.8°

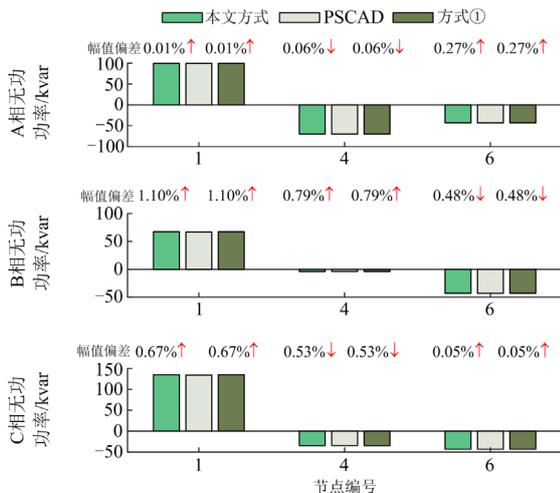


图 6 场景 2 下各计算方式无功功率结果对比

Fig. 6 Comparison of reactive power results of different calculation methods in scenarios 2

表 9 场景 2 下不同计算方式的零序分量结果

Table 9 Zero-sequence component results of different methods in scenarios 2

方式	节点零序电压 幅值/ $\times 10^{-2}$ p.u.				支路零序电流 幅值/ $\times 10^{-4}$ p.u.		
	3	4	5	6	3-4	4-5	6-5
本文方式	1.5	1.7	1.7	0.021	1.5	0.2	0.1
PSCAD	1.5	1.6	1.6	0.020	1.4	0.2	0.1
方式①	1.5	1.7	1.7	0.021	1.5	0.2	0.1

由表 8 可以看出，本文方式与方式①的电压结果一致，两者与 PSCAD 的电压幅值偏差为 0.04%，相角偏差为 0.2°。从图 6 可知，虽然替换了 B 相、C 相的无功功率方程，但是 B 相、C 相的无功功率不受影响。

由表 9 可见，本文方式与方式①的零序分量结果一致，两者与 PSCAD 的零序电压幅值偏差为 0.6%，零序电流幅值偏差为 0.8%。由于不接地网络存在不平衡的参数，导致网络中存在非零的零序电压和支路零序电流。

上述分析表明，在此场景下，本文方式与 PSCAD 的潮流结果一致，且误差在合理范围内。同时，结合场景 1 和场景 2，并对本文方法和方式①的结果可知，是否约束非负荷节点的零序电流对结果并不影响，即约束非负荷节点的零序电流、4 个功率方程和仅约束功率方程得到的结果一致，间接说明了功率平衡方程和零序电流方程本质是超定相容方程组。

3.6 大电网分析

为了验证算法在大电网中的适用性和收敛性，对原 IEEE123 系统进行两处修改：1) 去除原网络中的调压器，并添加变压器，将原网络按电压等级分为 3 大部分，变压器位置如图 7 所示，其参数如表 2 所示；2) 3.2 节—3.5 节的小系统算例已经验证算法在辐射型网络中的适用性，但本文尚未在不接地网络存在环网的情况下进行验证。为此，连接支路 39-66，将中压不接地网络构成环网。

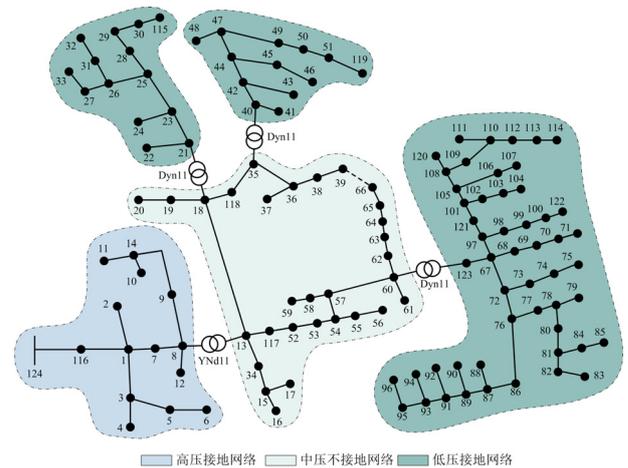


图 7 基于 IEEE123 算例修改的网架

Fig. 7 Modified network based on IEEE123

在计算过程中，迭代时间为 130 ms、迭代次数为 4 次。可见，本文算法在面对大电网时具有良好的计算速度，能够满足大电网的仿真需求，并且采用的零序约束不会显著增加收敛时间和迭代次数。

限于篇幅, 选取得到的中压不接地网络部分的三相电压进行展示, 如图 8 所示。

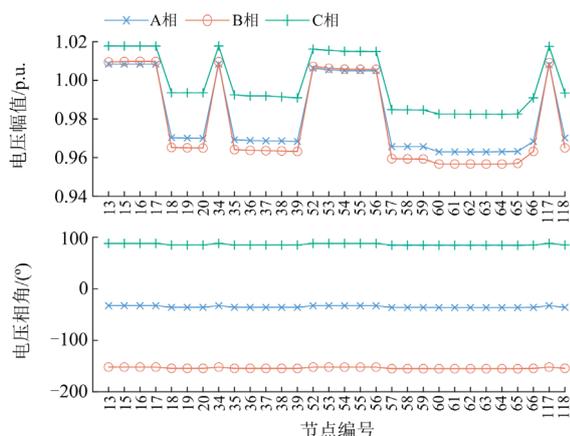


图 8 中压不接地网络节点电压

Fig. 8 MV ungrounded network node voltage

为了进一步分析本文方法在大电网下的收敛性, 本文设置不同的情景: 情景① 正常情况; 情景② 中压网络的负荷增加 40%; 情景③ 中压网络的负荷整体增加 80%; 情景④ 全网的负荷增加 40%; 情景⑤ 全网的负荷增加 80%; 情景⑥ 支路 36-38、54-57、62-63 的参数不平衡增加 40%; 情景⑦ 支路 36-38、54-57、62-63 的参数不平衡增加 80%, 得到迭代过程的功率不平衡趋势如图 9 所示。由图 9 可见, 本文方法在收敛精度取 10^{-6} 的情况下, 面对上述情景均能保持在 4 次内收敛, 收敛速度不受网络参数和负荷的影响, 具有快速稳定的收敛特性。

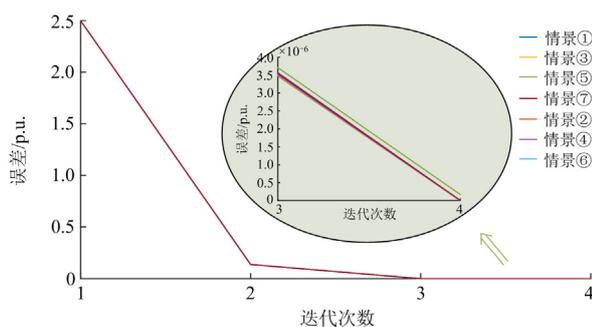


图 9 迭代过程的功率不平衡变化趋势

Fig. 9 Power unbalance trend of the iterative process

综合上述分析表明, 本文方法在大电网下仍然具有适用性, 且计算速度快、效率高和收敛性好, 具备在工程实际中广泛推广应用的潜力。

3.7 实际算例分析

我国 LY 市某区域的 35 kV 不接地系统母线出现严重的电压三相不平衡情况, 影响区域包含 3 座变电站, 4 台变压器和 2 条输电线路, 本文对此系

统进行仿真分析。

系统中, XS 变电站为 110 kV 等级变电站, 含两台绕组接法为 YNy_d 的变压器, 中压侧在不接地方式下运行, 其部分网架结构如图 10 所示。提取某时刻的断面潮流, XS 变电站的 110 kV 和 10 kV 母线的三相电压正常, I 变 35 kV 母线的电压三相不平衡度达 10%; II 变 35 kV 母线的电压三相不平衡度达 13%, I 变和 II 变 35 kV 绕组的中性点电压在 1 kV 左右, 且 35 kV 母线电压始终是 B 相最高, C 相最低。

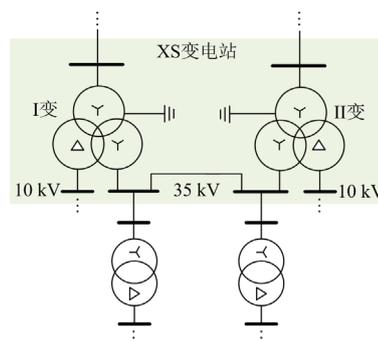


图 10 XS 变电站的运行网架

Fig. 10 Operation network of XS substation

基于上述条件, 结合历史负荷数据, 排除负荷三相不平衡原因。同时, 考虑到 XS 变电站的电压不平衡特征与相连的另外 2 座变电站特征一致, 排除单一量测设备误差造成电压三相不平衡的情况。通过现场测试得到 35 kV 母线的实际电容电流约 4 A, 且发现 XS 变电站的 I 变 35 kV 出口母线在 C 相挂接有电容型电压互感器, 电容约为 $0.02 \mu\text{F}$ 。

为此, 对 I 变出口母线设置不同参数, 参数如表 10 所示, 并利用本文方法进行仿真, 所得 35 kV 母线的三相电压结果如图 11 所示, 其中电容参数配置情况 3 时 XS 变电站的潮流的结果见附表 A1。由于实际电网中存在的分布参数、量测误差等, 导致仿真结果与实测存在差异。通过仿真情况可见, 挂接在母线上的单相电容型电压互感器是导致电压三相不平衡的原因之一, 另外的原因有可能是线路三相对地电纳不平衡, 具体原因需结合实际测试进行排查。

表 10 不同仿真参数

Table 10 Different simulation parameters

电容参数配置情况	对地电纳		
	A 相	B 相	C 相
1	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}
2	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}	6.6×10^{-5}
3	6.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	6.6×10^{-5}

s

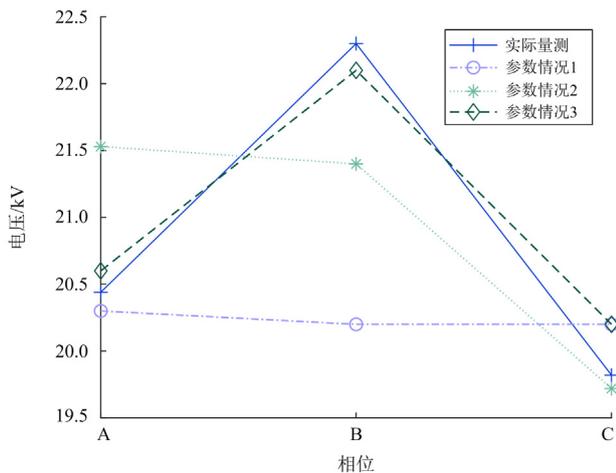


图 11 不同仿真参数时 I 变 35 kV 出口母线电压
Fig. 11 35 kV outlet bus voltage of substation I with different simulation parameters

通过复现实际不接地电网潮流情况，并与量测数据对比，表明本文方法在实际工程中具有较好的适用性，能够满足实际不接地配电网的潮流仿真需求，具有一定的工程参考价值。

附录 A

表 A1 XS 变电站的潮流结果对比

Table A1 Comparison of power flow results in XS substation

相位	XS 变电站母线	电压幅值/kV		XS 变电站支路电流	电流幅值/A	
		量测值	计算值		量测值	计算值
A	110 kV I 母	66.0	66.1	I 变 110 kV 出口	22.6	21.4
B		65.8	66.1		24.0	22.6
C		65.8	66.1		24.0	21.9
A	110 kV II 母	66.0	66.1	II 变 110 kV 出口	3.1	3.4
B		65.9	66.1		2.9	3.0
C		65.9	66.1		3.5	3.5
A	35 kV I 母	20.4	20.6	I 变 35 kV 出口	25.7	23.9
B		22.3	22.1		24.0	25.1
C		20.6	21.0		24.0	23.2
A	35 kV II 母	20.7	20.6	II 变 35 kV 出口	8.7	8.7
B		22.6	22.1		8.7	8.6
C		20.4	21.0		8.7	8.5
A	10 kV I 母	5.9	5.8	I 变 10 kV 出口	160.5	158.3
B		6.0	6.0		166.4	164.8
C		5.9	5.9		166.4	164.5
A	10 kV II 母	5.9	5.9	II 变 10 kV 出口	14.0	13.8
B		6.1	6.0		16.4	15.9
C		5.9	6.0		14.0	13.8

4 结论

本文分析不接地配电网的潮流特点，明确其存在的节点潮流变量不独立和变压器导纳矩阵奇异的问题，采用方程降阶和变压器导纳矩阵可逆化处理方法，结合潮流矩阵替换技术，提出一种中压不接地配电网三相潮流新算法。结论如下：

1) 基于功率平衡方程和牛拉法，考虑不接地配电网零序电流约束，采用相-地电压模型，可计及零序潮流对不接地网络的影响，分析中性点电压、零序电压和相-地电压不平衡情况；

2) 基于 6 节点和 IEEE123 系统，分析现有方法和本文方法计算结果，验证所提算法计算结果准确、收敛稳定、计算效率高，并基于实际算例说明本文方法具有良好的工程实用性；

3) 对变压器导纳矩阵可逆化处理，当添加较小导纳参数时不影响潮流结果，同时利用零序电流约束方程替换负荷节点的任意 2 个功率平衡方程的方式不影响潮流结果。

参考文献

- [1] 张颖, 寇凌峰, 季宇, 等. 计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 104-112.
ZHANG Ying, KOU Lingfeng, JI Yu, et al. Hierarchical and partitioned optimal control of distribution networks considering the coordination between energy storage and distributed generation systems[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 104-112.
- [2] 王秀茹, 刘刚, 黄华峰, 等. 考虑分布式电源的配电网无功调度和储能优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 134-142, 208.
WANG Xiuru, LIU Gang, HUANG Huafeng, et al. Reactive power dispatching and energy storage optimization for distribution network with distributed power resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 134-142, 208.
- [3] 杨亘焯, 孙荣富, 丁然, 等. 计及光伏多状态调节能力的配电网多时间尺度电压优化[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 105-114.
YANG Genye, SUN Rongfu, DING Ran, et al. Multi time scale reactive power and voltage optimization of distribution network considering photovoltaic multi state regulation capability[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 105-114.
- [4] 阮正鑫, 张逸, 张嫣, 等. 高比例光伏与配电网超高次谐波交互影响研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 18-25.
RUAN Zhengxin, ZHANG Yi, ZHANG Yan, et al. Interaction of high proportion photovoltaic and supraharmonic in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 18-25.
- [5] 徐艳春, 蒋伟俊, 孙思涵, 等. 含高渗透率风电的配电网暂态电压量化评估方法[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 152-162.
XU Yanchun, JIANG Weijun, SUN Sihan, et al. Quantitative assessment method for transient voltage of distribution network with high-penetration wind power[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 152-162.
- [6] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 32-41.
- [7] XIANG Yue, LU Yu, LIU Junyong. Deep reinforcement learning based topology-aware voltage regulation of distribution networks with distributed energy storage[J]. Applied Energy, 2023, 332: 120510.
- [8] 苏向敬, 刘一航, 张知宇, 等. 计及源荷不确定影响的不平衡配电网两阶段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 94-103.
SU Xiangjing, LIU Yihang, ZHANG Zhiyu, et al. Two-stage optimization of unbalanced distribution networks considering impacts of DG and load uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 94-103.
- [9] LIN Shengyuan, JIN Renyun, QIU Haifeng, et al. Practical method for mitigating three-phase unbalance based on data-driven user phase identification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1653-1656.
- [10] 马兆兴, 秦昌民, 朱文杰, 等. 考虑多时间尺度特征的电力系统稳定性界分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 29-37.
MA Zhaoxing, QIN Changmin, ZHU Wenjie, et al. Analysis of the stability bound of a power system considering multi-time scale characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 29-37.
- [11] ZHANG Cuo, XU Yan, WANG Yu, et al. Three-stage hierarchically-coordinated voltage/var control based on PV inverters considering distribution network voltage stability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 868-881.
- [12] 阮梓航, 肖先勇, 胡文曦, 等. 基于多粒度特征选择和模型融合的复合电能质量扰动分类特征优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 1-10.
RUAN Zihang, XIAO Xianyong, HU Wenxi, et al. Multiple power quality disturbance classification feature optimization based on multi-granularity feature selection and model fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 1-10.
- [13] LI Ruisheng, WONG P, WANG Kun, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.
- [14] 国家电网公司. 配电网技术导则: Q/GDW10370—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [15] CHEN Jiaqi, WU Wenchuan, ROALD L A. Data-driven piecewise linearization for distribution three-phase stochastic power flow [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1035-1048.
- [16] WANG Chun, AO Xin, FU Wenbin. Three-phase power flow calculation considering probability and interval uncertainties for power distribution systems[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2019, 13(20): 3334-3345.

- [17] 邓红雷, 张莉彬, 唐崇旺, 等. 一种含分布式电源的配电网三相潮流混合计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 10-17.
DENG Honglei, ZHANG Libin, TANG Chongwang, et al. A hybrid calculation method of three-phase power flow with distributed generation resource on a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 10-17.
- [18] 林金榕, 张逸, 李传栋, 等. 基于矩阵范型的配电网三相谐波潮流算法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 165-171.
LIN Jinrong, ZHANG Yi, LI Chuandong, et al. Three-phase harmonic power flow algorithm of distribution network based on matrix paradigm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 165-171.
- [19] ZIMMERMAN R D, CHIANG H D, MIU K N. Transformer modeling using line-to-line voltages in ungrounded power distribution networks[C] // Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Toronto, Canada: 1033-1036.
- [20] 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 Hongjia, WU Wenchuan, et al. A novel transformer modeling method for overcoming divergence of three-phase power flow in ungrounded power distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 53-57.
- [21] 高元海, 王淳, 辛建波, 等. 计及接地阻抗及含多种分布式电源的中低压配电网三相潮流计算(一): 模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2619-2627.
GAO Yuanhai, WANG Chun, XIN Jianbo, et al. Three-phase power flow calculation of medium-low voltage distribution network considering grounding impedance and containing various distributed generators, part I: models[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2619-2627.
- [22] 罗兰, 赵霞, 颜伟, 等. 考虑电源电压控制特性的不接地配电网改进三相潮流模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 92-98.
LUO Lan, ZHAO Xia, YAN Wei, et al. Improved three-phase power flow model for ungrounded distribution network considering controllability of line-to-line voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 92-98.
- [23] 赵霞, 罗兰, 汪凡, 等. 含不接地逆变电源的中低压配电网三相潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5421-5430, 5718.
ZHAO Xia, LUO Lan, WANG Fan, et al. Three-phase power flow model for integrated medium and low-voltage distribution system with ungrounded inverter sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5421-5430, 5718.
- [24] 索南加乐, 付伟, 刘文涛, 等. 中性点不接地配网潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 86-91.
SUONAN Jiale, FU Wei, LIU Wentao, et al. Study on power flow algorithm for ungrounded distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 86-91.
- [25] 颜伟, 杨焕燕, 赵霞, 等. 中性点不接地配网的三相潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 135-141, 10.
YAN Wei, YANG Huanyan, ZHAO Xia, et al. Three-phase power flow model for ungrounded distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 135-141, 10.
- [26] 高元海, 王淳, 辛建波, 等. 计及接地阻抗及含多种分布式电源的中低压配电网三相潮流计算(二): 算法和算例[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3707-3717.
GAO Yuanhai, WANG Chun, XIN Jianbo, et al. Three-phase power flow calculation of medium and low voltage distribution network considering grounding impedance and containing various distributed generators, part II: algorithm and case study[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3707-3717.
- [27] 吴文传, 张伯明. 变压器详细模型推导与三相配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 53-56.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. Derivation of detailed transformer models and three-phase power flow for distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 53-56.
- [28] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[D]. 北京: 科学出版社, 2003.

收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-02-16

作者简介:

张逸(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析、电能质量分析; E-mail: zhangyi@fzu.edu.cn

林金榕(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析和电能质量分析; E-mail: wethey@foxmail.com

李传栋(1979—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析和电网规划。E-mail: lichuandong@126.com

(编辑 张颖)