

1-16-2023

Research on energy saving and loss reduction method of three-phase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow

Chenqi ZHANG

Daxing Power Supply Company, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 102600, China

Chenghao ZHU

Daxing Power Supply Company, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 102600, China

Yang LI

State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China

Zhong LIANG

State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China

Kang ZHANG

Daxing Power Supply Company, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 102600, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

ZHANG, Chenqi; ZHU, Chenghao; LI, Yang; LIANG, Zhong; ZHANG, Kang; and DONG, Tianshu (2023) "Research on energy saving and loss reduction method of three-phase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 37: Iss. 6, Article 25. DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.025
Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss6/25>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Research on energy saving and loss reduction method of three-phase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow

Authors

Chenqi ZHANG, Chenghao ZHU, Yang LI, Zhong LIANG, Kang ZHANG, and Tianshu DONG

基于随机模糊潮流的三相不平衡 配电网节能降损方法

张辰琪¹, 朱成昊¹, 李 洋², 梁 中², 张 康¹, 董天舒¹

(1. 国网北京市电力公司大兴供电公司, 北京 102600; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100051)

摘 要: 为有效降低三相不平衡导致的配电网能量损耗, 提出一种基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损方法。分析三相不平衡配电网的危害, 获取配电网不平衡状态程度和线路有功损耗。充分考虑配电网三相不平衡状况下负荷的不确定性影响, 采用随机模糊相容性方法对配电网线路的负荷执行模糊建模操作, 将所获模糊输入变量引入潮流模型中, 构建三相不平衡模糊潮流模型, 获取三相模糊潮流计算结果的配电网有功功率损耗。并构建节能降损目标函数, 采用动态改变因子粒子群算法求解获得最优解, 实现配电网节能降损。算例仿真计算结果表明: 该方法可以实现三相不平衡下的配电网节能降损, 且目标函数求解时收敛性能较好, 节能降损效率较高。

关 键 词: 随机模糊潮流; 三相不平衡; 节能降损; 负荷概率分布; 可能性分布; 粒子群算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.025 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2022)06-0212-07

Research on energy saving and loss reduction method of three-phase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow

ZHANG Chenqi¹, ZHU Chenghao¹, LI Yang², LIANG Zhong²,
ZHANG Kang¹, DONG Tianshu¹

(1. Daxing Power Supply Company, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 102600, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China)

Abstract: In order to effectively reduce the power loss caused by three-phase imbalance in distribution network, an energy saving and loss reduction method of three-phase imbalance distribution network based on random fuzzy power flow is proposed. This paper analyzes the harm of three-phase unbalanced distribution network, and obtains the unbalanced degree of distribution network and active power loss of line. Considering the uncertain influence of three-phase balanced distribution network load, the random fuzzy compatibility method is used to perform fuzzy modeling of the loads of distribution networks. The obtained fuzzy input variables are introduced into the power flow model to construct a three-phase unbalanced fuzzy power flow model, which can be utilized to calculate the active power loss of distribution network. The objective function including energy saving and loss reduction is constructed, and the dynamic change factor particle swarm optimization algorithm is used to obtain the optimal solution, so as to achieve energy saving and loss reduction of distribution network. The case study shows that the proposed method can achieve energy

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 国网北京市电力公司科技攻关项目(202202018001X)

通信作者: 张辰琪(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电气工程及其自动化研究; E-mail: zjh234@163.com

saving and loss reduction of distribution network under the condition of three-phase imbalance, and the objective function has good convergence performance and high efficiency of energy saving and loss reduction.

Key words: stochastic fuzzy power flow; three phase unbalance; energy saving and loss reduction; load probability distribution; probability distribution; particle swarm optimization

随着电力技术与互联网技术的不断发展,能源互联网建设进程不断加快,配电网中接入了大量的新能源分布式电源与冷热电能量枢纽,这使得主动配电网正在向能源清洁化、多元化的“有源”方向转变,主动配电网“有源”的发展特性导致配电网中存在多种电网能源,多种电网能源的存在大大增加了配电网潮流与电压分布的复杂性,使配电网出现三相不平衡负荷,三相不平衡负荷的产生会导致配电网中出现零序电流以及降低配变出力,从而造成配电网能源损耗增加^[1-2]。

采取合适的节能降损方法是有效节约电网能源与降低电网能源损耗的关键^[3]。为此,国内诸多学者对三相不平衡条件下的电网节能降损方法进行了研究并提出了相应的研究方法。文献[4]提出基于分布式电源下垂控制和负荷静态特性的三相不平衡电网节能降损方法的研究,建立了三相不平衡孤岛微电网直接潮流算法的计算模型,为对模型进行求解,提出了两层潮流迭代法,其中内层潮流迭代法用于求解虚拟节点外的三相不平衡孤岛微电网的潮流计算,外层潮流迭代法用于更新虚拟节点电压和系统角频率;文献[5]提出基于纵横交叉算法的变压器三相不平衡降损方法,将传统的随机初始权值阈值改为经过纵横交叉算法得到的最优权值与阈值,并将最优值代入训练模型中,得到基于纵横交叉算法神经网络的变压器三相不平衡损耗评估模型;将该模型的损耗评估、公式法计算及实验得出的结果与现场实验数据进行对比,得出此模型得出的结果更接近实验值;文献[6]提出了一种配电网三相负荷不平衡的优化调度治理技术,采用换相开关型三相负荷自动调节装置治理三相负荷不平衡。以上这些方法都实现了对电网的节能降损,一定程度上降低了电网能源损耗,但是在对基于三相不平衡配电网节能方法的研究中,均未考虑配电网中不确定变量对电网潮流的影响,使得对配电网潮流分布的分析有所偏差,导致配电网节能减损效果不够理想。

模糊潮流隶属于不确定分析方法的范畴,可对

配电网中存在的不确定因素进行有效分析,从而得到配电网变量的可能性分布,将其应用于配电网的节能降损工作中,可获得较为精确的配电网潮流分布,从而获得较为理想的配电网节能降损效果^[7]。为此本文提出一种基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损方法,可以更好地完成配电网节能降损,满足实际配电网节能降损工作需要。

1 随机模糊潮流三相不平衡配电网节能降损

1.1 基于三相不平衡的配电网线损分析

1.1.1 三相不平衡配电网危害

三相不平衡对配电网能量消耗方面所造成的主要危害如下。

1)三相不平衡条件下配电线路消耗的能量会大幅度增加^[8]。主要原因是由于电力系统在进行供电时,三相不平衡不可能被完全消除,因而当配电线路中有电流通过输电线路的导线时,导线会对电流进行一定程度的阻抗,产生一定的电能损耗,从而导致配电线路中线路损耗增加。

2)三相不平衡会增加主动配电网中变压器的电能损耗。究其原因主要是配电变压器的功率损耗与三相不平衡的程度呈正相关。导致变压器电能损耗增加的原因如下。

①三相不平衡导致配电网变压器中零序电流的出现。零序电流的大小与三相不平衡程度正相关,当零序电流达到一定数值,会导致配电网中变压器部件温度升高,从而加速变压器的老化,增加配电变压器的电能损耗。

②三相不平衡导致配变出力降低。每相的额定容量会影响配电变压器出力的最高限值,三相不平衡的程度直接影响配电变压器出力的减少程度。配变出力的减少,会降低配电变压器的过载能力,从而导致变压器温度升高,增加变压器的能量损耗^[9]。

三相不平衡程度公式^[9]可以表示为

$$\rho_{\varphi}=\left(\frac{I_{\varphi}}{I_{av}}-1\right)\times 100\% \quad (1)$$

式中 I_{φ} 为各相电流; I_{av} 为三相电流的平均值; ρ_{φ} 为三相不平衡程度,若 ρ_{φ} 为负值则表示该相电流小于三相电流的平均值。

1.1.2 三相不平衡配电网线损分析

配电网中电能的损耗程度可以用来衡量配电网运行的经济性^[10]。当配电网在三相不平衡状况下进行电力供电时,配电网中电能的损耗会相应增加。本文以配电线路上增加的电能损耗为例,对三相不平衡状况下配电线路的线损进行分析。

换相开关通过智能化逻辑判断自动选择供电相,自动调整三相负荷的不平衡。假定配电线路中三相参数呈现对称的状态,可将配电线路中正序、负序阻抗表示为

$$\begin{cases} D_2=D_1 \\ D_1=R_1+jX_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 R_1 为正序电阻; X_1 为正序电抗; D_1 、 D_2 分别为配电线路正序、负序阻抗。

零序阻抗可表示为

$$D_0=k_R R_1+jk_X X_1 \quad (3)$$

其中,若用 D_g 代表三倍等效接地阻抗,则满足 $D_g \in D_0$ 。当系统为不接地系统时,有无穷大的 D_0 ;当系统为零阻抗接地系统时,三倍等效接地阻抗的取值为 0。 k_R 与 k_X 代表 2 个系数, k_R 的取值满足 $k_R > 4$, k_X 的取值满足 $k_X < k_R$ 。

假定配电网中三相电源呈现正弦与对称的状态,那么三相平衡状况下的配电线路的功率损失可描述为

$$\begin{aligned} \Delta s &=3\bar{U}_1\dot{I}_1^*=3\bar{I}_1\dot{I}_1^*+D_1\dot{I}_1^*= \\ &3I_1^2D_1=3I_1^2R_1+j\cdot 3I_1^2X_1 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 I_1 为正序电流; $\bar{U}_1$ 为正序相电压; $\bar{I}_1$ 为正弦正序电流; $\dot{I}_1^*$ 为对称正序电流。

由式(4)将有功功率的损耗表示为

$$\Delta p=3I_1^2R_1 \quad (5)$$

以上述三相平衡时的额定正序电流为标准,当配电网运行时,由于三相不平衡状况下配电线路中的电流会存在零序、负序的情况,故配电线路的功率损失可表示为

$$\begin{aligned} \Delta s' &=3\bar{U}_0\dot{I}_0^*+3\bar{U}_1\dot{I}_1^*+3\bar{U}_2\dot{I}_2^*=3(\bar{I}_0D_0)\dot{I}_1^*+ \\ &3(\bar{I}_1D_1)\dot{I}_1^*+3(\bar{I}_2D_2)\dot{I}_2^*=3I_1^2\epsilon_0^2D_0+ \\ &3I_1^2\epsilon_1^2D_1+3I_1^2\epsilon_2^2D_2=3I_1^2(1+\epsilon_2^2+ \\ &\epsilon_0^2k_R)R_1+3I_1^2Z(1+\epsilon_2^2+\epsilon_0^2k_X)X_1 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $\bar{U}_0$ 为额定零序电压; $\bar{I}_0$ 为额定零序电流; $\dot{I}_0^*$ 、 $\dot{I}_2^*$ 分别为对称零序、负序电流; ϵ_0 、 ϵ_1 、 ϵ_2 分别为零序、正序、负序波动系数。

由式(6)可将三相不平衡状况下配电线路所消耗的有功功率表示为

$$\Delta s''=3I_1^2R_1+3I_1^2\epsilon_2^2R_1+3I_1^2\epsilon_0^2k_RR_1 \quad (7)$$

1.2 计及负荷不确定性的三相不平衡模糊潮流模型构建

1.2.1 基于不确定变量的负荷模糊建模

由于配电线路规模庞大,配电线路以及电力节点的数量繁多,且运行过程中存在三相负荷不平衡的状况,因而导致配电线路各项参数以及负荷数据具有显著的不确定性,这使得配电线路的负荷一直处于不断变化的过程中,从而无法准确地获取配电线路的准确负荷数据^[11]。模糊潮流隶属于不确定分析方法的范畴,可对配电网中存在的不确定因素进行有效分析,从而得到配电网变量的可能性分布。因此,本文采用随机模糊相容性分析方法对配电网线路运行中的负荷执行模糊建模操作。

将配电线路负荷的随机模糊相容性原理^[11]表述为

$$\prod(b)\geq p(b),\forall b\subseteq U \quad (8)$$

式中 $\prod(b)$ 为线路负荷分布的可能性测度; p 为线路负荷的概率分布; $p(b)$ 为线路负荷概率分布的测度; $\forall b$ 为当前线路负荷信号集; U 为有限集。

式(8)表明线路负荷分布的可能性测度不小于线路负荷概率分布的测度,并且当前线路负荷信号集在有限集的范围。

如果用 π 表示通过执行转换操作后得到的可能性分布函数,并且将 p 达到峰值时的对应点表示为 b_0 ,则有

$$\begin{cases} p(b)=\sum_{b_a\in 1}p(b_0) \\ \prod(b)=\sup_{b_c\in 1}\{\pi(b)\} \end{cases} \quad (9)$$

式中 b 为待进行可能性运算的参量; $\pi(b)$ 为参量的可能性分布,对应的最低点和最高点分别是 b_a, b_c 。

若满足 $b_c \in [b_0, \infty], b_a \in [-\infty, b_0]$, 则有

$$p(b_c) = p(b_a) \quad (10)$$

式中 $p(b_c)$ 为可能性分布参量最高概率分布测度值; $p(b_a)$ 为分布参量的最低概率分布测度值。

最终的概率分布与可能性分布转换可表述为

$$\begin{cases} \pi(b_a) = \left(\int_{-\infty}^{b_a} p(b) db + \int_{b_c}^{+\infty} p(b) db \right) \\ \pi(b_c) = \pi(b_a) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\pi(b_c)$ 为可能性分布参量的可能性分布值; $\pi(b_a)$ 为最终概率分布参量的可能性分布值。

根据随机模糊原理,对配电线路执行模糊建模操作,建模步骤如下:

1) 假定配电线路的负荷期望值与配电线路负荷的实际数值一致,使配电线路的负荷符合正态分布特征,获得相应地配电线路负荷概率密度曲线^[12-13];

2) 由于应用有限元软件进行分析可获得满足需求的近似解,因此,通过应用有限元软件执行相关编程操作,获得配电线路负荷可能性分布曲线,完成配电线路负荷模糊建模。

1.2.2 三相不平衡模糊潮流模型构建

在潮流计算模型中执行模糊变量输入操作,可将模糊潮流模型的一部分运算成功向模糊数运算转换,从而降低潮流计算的复杂度,提高运算的准确率。以配电线路负荷不确定性执行模糊建模操作后获得的建模结果为依据,构建三相不平衡模糊潮流模型:

$$\mathbf{I}'_i = \sum_{q=1}^N \mathbf{Y}'_{iq} \mathbf{U}'_q \quad (12)$$

式中 $\mathbf{I}'_i$ 为向端点 i 注入的模糊电流向量的列向量; $\mathbf{Y}'_{iq}$ 为配电线路支路 $i-q$ 的模糊导纳矩阵; $\mathbf{U}'_q$ 为端点 q 注入的模糊电压列向量; N 为端点数量。

端点 i 注入的模糊电流包括两部分:一部分是电源注入的电流,另一部分是负荷注入的电流,即

$$\mathbf{I}'_i = \mathbf{I}_{Gi} + \mathbf{I}'_{Li} = \mathbf{I}_{Gi} + f(p'_i + qQ'_i) \quad (13)$$

式中 $\mathbf{I}_{Gi}$ 为端点 i 的电源注入的电流相量列向量; $\mathbf{I}'_{Li}$ 为端点 i 的负荷注入的电流相量列向量; $f(\cdot)$ 为负荷吸收功率 $p'_i + qQ'_i$ 与负荷电流之间的函数关系,除了受负荷类型、接线条件的影响外,主要取决

于所构建的基于不确定变量负荷模糊模型。

基于三相模糊潮流的配电网有功功率损耗的计算过程可表示为

$$\begin{cases} \Delta p' = \sum_{i \in \varphi_G} \sum_{p \in \varphi_p} (p_{G,i}^p - p_{L,q}^p) \\ p_{G,i}^p = (\hat{U}_i^p)' \cdot (\hat{I}_i^{p*})' \end{cases} \quad (14)$$

式中 $p_{G,i}^p$ 为电源端点 i 的线路负荷概率分布 p 的模糊注入有功功率; $p_{L,q}^p$ 为负荷端点 q 的线路负荷概率分布 p 模糊注入有功功率; $(\hat{U}_i^p)'$ 为电源端点 i 的线路负荷概率分布 p 为地模糊电压向量; $(\hat{I}_i^{p*})'$ 为电源端点 i 的线路负荷概率分布 p 一地模糊电流向量; φ_p 为电源端点总数; φ_G 为负荷端点总数。

1.3 随机模糊潮流三相不平衡配电网节能降耗实现

有效结合三相不平衡程度、不平衡状态下的线路有功损耗以及计及负荷不确定性的模糊潮流模型所获配电网有功损耗,共同实现基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降耗^[14-15]。

将式(1)、(7)与式(14)相结合,构建基于随机模糊潮流的三相不平衡电网节能降耗目标函数,即

$$f''' = \rho_\varphi \cdot \Delta s'' \cdot \Delta p' \quad (15)$$

式中 $\Delta s''$ 为三相不平衡状况下配电线路所消耗的有功功率; $\Delta p'$ 为配电网有功功率损耗。

针对目标函数式(15),应用一种动态改变学习因子的简化粒子群算法进行求解操作,具体求解步骤如图 1 所示。

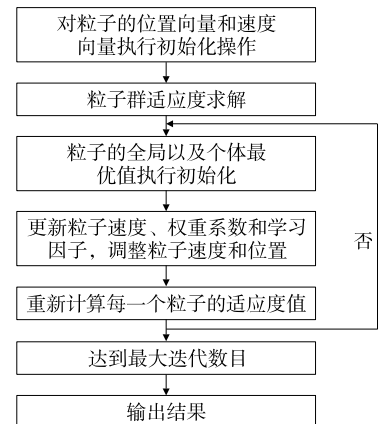


图 1 粒子群算法进行求解步骤

Figure 1 Particle swarm optimization algorithm for solving steps

2 实验与分析

为了验证基于随机模糊潮流的三相不平衡电网节能降损方法的有效性,将 IEEE 34 节点系统作为实验对象,构建一种含有分布式电源的三相不平衡配电网。应用本文方法对 IEEE 34 节点系统执行配电网节能降损操作,验证本文方法在配电网节能降损方面的性能。

实验时通过 Matlab 仿真软件编制三相不平衡配电网潮流程序,对实验三相不平衡配电网的随机模糊潮流进行运算,同时分析不同分布式电源接入情况下配电网电压分布情况。实验时配电网中的分布式电源部署情况如表 1 所示(均为 PQ 节点)。

表 1 分布式电源部署情况

Table 1 Deployment of distributed power supply					
DG	节点位置	容量/kW	DG	节点位置	容量/kW
1	32	105	3	8	40
2	16	38	4	2	85

该三相不平衡配电网的负荷情况如图 2 所示,可知该三相不平衡配电网的负荷情况具备显著的不确定性。通过实验仿真,采用本文方法分析节能降损前、后不同时刻的三相不平衡配电网三相电流值,分别如图 3、4 所示,可知通过本文方法的节能降损控制后,实验配电网的三相电流值基本一致,解决了配电网的三相不平衡问题。

通过本文方法进行节能降损控制后,实验分析不同时刻配电网三相不平衡度以及功率损耗情况,如表 2 所示,可知实验配电网采用本文方法进行节能降损控制后的三相不平衡度以及功率损耗,都比降损前大大降低,充分验证了本文节能降损方法的优势。

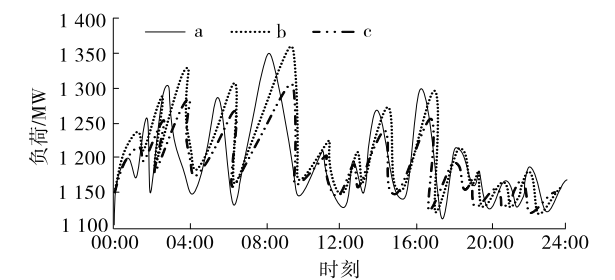


图 2 三相不平衡配电网的负荷情况

Figure 2 Load situation of three-phase unbalanced distribution network

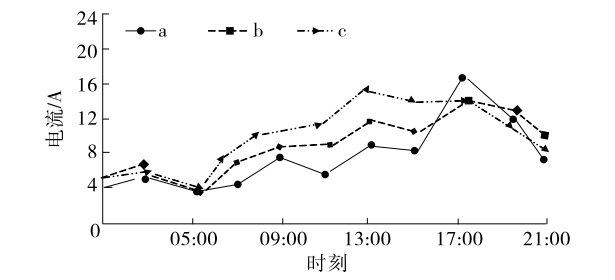


图 3 降损前配电网三相电流情况

Figure 3 Three-phase current of distribution network before loss reduction

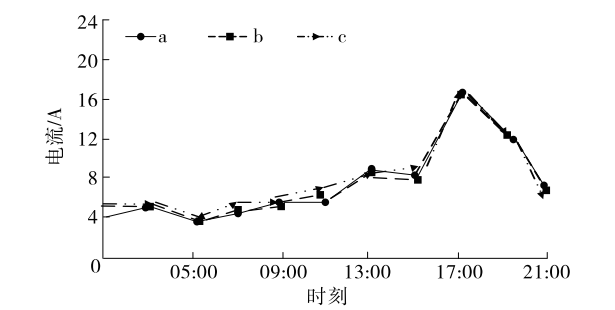


图 4 降损后配电网三相电流情况

Figure 4 Three-phase current of distribution network after loss reduction

表 2 降损前、后配电网不平衡度以及功率损耗情况

Table 2 Unbalance and power loss of distribution network before and after loss reduction				
时刻	不平衡度/%		功率损耗/W	
	降损前	降损后	降损前	降损后
01:00	28.59	10.25	19.50	10.6
03:00	22.18	8.65	12.60	9.5
05:00	32.52	26.75	15.50	8.6
07:00	25.06	17.46	52.50	23.8
09:00	16.28	10.62	85.60	53.5
11:00	8.16	5.26	95.80	73.6
13:00	13.68	9.52	110.80	82.8
15:00	28.26	20.63	108.60	72.6
17:00	14.65	6.87	90.26	75.4
19:00	16.58	11.36	145.60	115.2
21:00	30.28	25.46	115.30	95.6

为进一步验证本文方法在配电网节能降损方面的性能,分别应用本文方法、文献[4]基于分布式电源下垂控制和负荷静态特性的三相不平衡电网节能降损方法、文献[5]基于纵横交叉算法的三相不平衡配电网节能降损方法,对某市配电线路执行节能降损操作,获得该市某日的日节能降损效果,如图 5 所示。

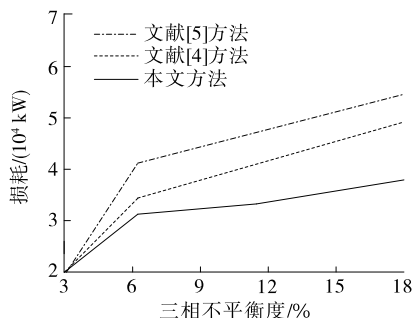


图 5 节能降损效果

Figure 5 Effect of energy saving and loss reduction

由图 5 可知,随着三相不平衡度的增加,该市配电线路产生的损耗也随之增加,但是应用本文以及文献[4]、[5]中方法对该市配电线路执行节能降损操作后,应用本文方法获得的配电网能量损耗曲线始终低于文献[4]、[5]方法,且随着三相不平衡度的增加曲线波动上升趋势最为平缓。主要是由于本文方法有效结合了三相不平衡程度、不平衡状态下的线路有功损耗以及计及负荷不确定性的模糊潮流模型所获配电网有功损耗,共同实现了基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损。实验证明:应用本文方法对配电网进行节能降损具有更好的节能降损效果,在配电网节能降损方面更具优势。

3 结语

应用本文方法可以实现配电网节能降损,并且在不同三相不平衡度下的配电网节能降损效果均较好,其在配电网节能降损方面的优势主要体现在以下 2 个方面:

1)应用本文方法对配电网执行节能降损操作获得的不同三相不平衡度下的配电网能量损耗曲线与文献[4]、[5]方法相比,曲线的上升趋势最为平缓,具有更好的节能降损效果;

2)在进化代数约为 130,应用本文方法时目标函数便达到了收敛状态,具有较好的收敛效果,在实际的配电网节能降损工作中,可提高配电网节能降损的效率。

但是在对不确定变量的考虑中,本文主要考虑了负荷的不确定性对配电网潮流的影响,未考虑导线长度以及电源出力的不确定性对配电网潮流分布的影响,下一阶段对三相不平衡配电网节能降损方

面的研究将主要从导线长度、电源出力对配电网潮流影响的角度出发,进一步对基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损方法进行相关研究。

参考文献:

- [1] 马瑞,敖维安.三相不平衡主动配电网随机模糊安全距离研究[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7600-7609.
MA Rui, AO Wei'an. Research on random fuzzy safety distance of three-phase unbalanced active distribution network[J]. Proceedings of CSEE, 2020, 40(23): 7600-7609.
- [2] 李红伟,潘力,韩璐,等.基于电压幅值对数变换的配电网三相不平衡线性潮流计算[J].中国电力,2022,55(5):143-148.
LI Hongwei, PAN Li, HAN Lu, et al. Three-phase unbalanced linear power flow calculation based on voltage magnitude logarithmic transformation[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 143-148.
- [3] 左剑,汤吉鸿,钟伟,等.考虑输电交互的含风电场电力系统多目标动态随机模糊最优潮流[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):50-60.
ZUO Jian, TANG Jihong, ZHONG Wei, et al. Multi-objective dynamic stochastic fuzzy optimal power flow of power system with wind farm considering transmission and distribution interaction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 50-60.
- [4] 苏向敬,郭隆海,符杨,等.计及分布式电源下垂控制和负荷静态特性的三相不平衡孤岛微电网直接潮流算法[J].电力自动化设备,2020,40(10):99-106.
SU Xiangjing, GUO Longhai, FU Yang, et al. Direct power flow algorithm of three-phase unbalanced islanded microgrid considering droop control of distributed generation and static characteristics of load[J]. Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 99-106.
- [5] 陈子辉,吴智影,刘贺,等.基于纵横交叉算法的变压器三相不平衡损耗研究[J].电网与清洁能源,2020,36(7):57-63.
CHEN Zihui, WU Zhiying, LIU He, et al. Research on three-phase unbalanced loss of transformer based on crossbar algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 57-63.
- [6] 植俊,刘廷章.配电网三相负荷不平衡的优化调度治理技术研究[J].工业控制计算机,2019,32(2):149-150 +

- 153.
- ZHI Jun, LIU Tingzhang. Research on optimal dispatch and control technology of three-phase load imbalance in distribution network[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(2): 149-150+153.
- [7] 宋朋勋, 郝丽丽, 楼伯良, 等. 基于配电网节能降损协调优化的电压控制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 101-107.
- SONG Pengxun, HAO Lili, LOU Boliang, et al. Voltage control method based on coordinated optimization of energy saving and loss reduction in distribution network[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 101-107.
- [8] 尹爱辉, 林祺蓉, 王俏俏, 等. 考虑不确定性的三相不平衡配网 DG 选址定容研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(6): 38-45.
- YIN Aihui, LIN Qirong, WANG Qiaoqiao, et al. Distributed generations optimal locating and sizing in unbalanced three phase distribution systems considering the uncertainties[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 38-45.
- [9] 魏梅芳, 胡毕正, 庞文龙, 等. 基于动态三相不平衡度的配电网线损计算方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 104-108.
- WEI Meifang, HU Bizheng, PANG Wenlong, et al. Calculation method of distribution line loss based on dynamic three-phase unbalance degree[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 104-108.
- [10] 刘澄, 李哲, 吕捷, 等. 基于无功控制的光伏逆变器三相不平衡抑制方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 107-114.
- LIU Cheng, LI Zhe, LÜ Jie, et al. Three-phase unbalance suppression method of photovoltaic inverter based on reactive power control[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 107-114.
- [11] 吴斌, 单来支, 王庆, 等. 基于三相不平衡的分布式光伏接入配电网的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 108-114.
- WU Bin, SHAN Laizhi, WANG Qing, et al. Research on optimal configuration of distributed photovoltaic access distribution network based on three-phase imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 108-114.
- [12] 王维洲, 汤红卫, 刘福潮, 等. A+~E 类区域配电网降损潜力评估模型研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 59-65.
- WANG Weizhou, TANG Hongwei, LIU Fuchao, et al. A+~E regional distribution network loss reduction potential evaluation model research[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 59-65.
- [13] 程慧, 王镜芳, 胡程平, 等. 基于数据挖掘技术的低压台区线损检测研究[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(2): 61-65.
- CHENG Hui, WANG Jingfang, HU Chengping, et al. Research on line loss detection in low-voltage substation based on data mining technology[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(2): 61-65.
- [14] 汪司珂, 明东岳, 郭雨, 等. 基于 AQPSO-LSSVM 的电网线损率预测模型[J]. 计算技术与自动化, 2020, 39(4): 75-80.
- WANG Sike, MING Dongyue, GUO Yu, et al. Line loss rate prediction model based on AQPSO-LSSVM[J]. Computing Technology and Automation, 2020, 39(4): 75-80.
- [15] 杜振东, 沈春林, 滕晓兵, 等. 计及全时空要素的配电网综合节能评价方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 13-23.
- DU Zhendong, SHEN Chunlin, TENG Xiaobing, et al. Comprehensive energy-saving evaluation method of distribution network considering all time and space factors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 13-23.