

考虑不确定性的谐波潮流计算研究综述

随着电网中非线性负荷大量增加以及间歇性能源的发展,非线性和随机波动性导致电力系统谐波潮流的不确定性,考虑不确定性的谐波潮流计算因此得到广泛研究。首先介绍谐波潮流计算基本方法,即传统的确定性谐波潮流算法。其次,概述不确定性谐波潮流计算的发展,并重点论述潮流计算中不确定性信息的处理方法,目前主要为三类方法:概率潮流法、模糊潮流法和区间潮流法。最后,对考虑不确定性的谐波潮流算法进行探讨,为这一领域相关研究提供参考。

张慧祥¹ 张孔林^{1,2} 张逸^{1,2}/1.福州大学电气工程与自动化学院 2.国网福建省电力有限公司电力科学研究院

0 引言

谐波潮流计算是研究电力潮流中谐波问题^[1-3]的重要手段,通过谐波潮流计算可以了解全网络谐波潮流分布情况,得出电网各节点的谐波指标,这是评估电力系统安全运行的重要依据,另外,根据谐波潮流计算结果还可分析谐波产生的原因,进而研究谐波治理措施。

传统的谐波潮流算法没有考虑到电网中存在的确定性因素,所以多为确定性谐波潮流算法,而实际电网中,由于负荷种类多且变化频繁,电网负荷功率存在不确定性,并且随着新兴能源的利用——分布式电源(Distributed Generation, DG)越来越多地接入电网, DG的功率输出受天气变化等因素的影响具有很大的随机波动性^[4]。由于节点功率的不确定性,导致非线性节点谐波

电流的不确定性,进而给电力系统带来了不确定性谐波等电能质量问题^[5]。对电力潮流中这些不确定性谐波的分析与研究,传统的确定性谐波潮流算法已经难以满足其需要,因此,不确定性谐波潮流算法具有重要的研究意义。

本文首先从研究历程和计算方法两方面对传统谐波潮流计算进行介绍;其次,概述不确定性谐波潮流算法,其关键在于如何处理对不确定性信息;最后,总结研究现状并展望未来发展趋势。

1 传统谐波潮流计算

1.1 谐波潮流计算的研究历程

20世纪30年代,学者已开始关注谐波问题,伴随工业技术的大力发展,电力系统非线性负载大量增加,如现代工业中广泛应用的高频炉、电弧、矿热炉以及硅铁炉等,与此同时,电力电子技术的成熟,使晶闸管整流和换流技术得到广泛应用,这都使得电网中的谐波大量增加。谐波对电力系统具有的危害如:导致电器装置过热、绝缘老化、缩短用电装置寿命、降低供电系统的功率因数、引起电力系统的并联和串联谐振以及损坏电容器等。为解决谐波危害,各工业国家纷纷对谐波问题进行研究,20世纪70年代以来,作为谐波问题研究的重要内容,谐波潮流计算也得到了相应发展^[6]。下文将介绍传统确定性谐波潮流算法,即谐波潮流基本算法。

1.2 谐波潮流求解方法

电力系统谐波电流的产生,主要原



张慧祥/硕士研究生

关键词/Keywords

谐波潮流计算·
不确定性·
概率潮流法·
模糊潮流法·
区间潮流法·

国网福建省电力有限公司科技项目(52130414005K)。

因是由于正弦电压加于非线性负载,基波电流在非线负载畸变产生,即可以认为谐波潮流是由基波潮流的一部分转换而来。求解过程中,根据基波潮流与谐波潮流之间的求解关系,本文将求解方法归纳为四类。

(1) 整体迭代法

整体迭代法^[7-8]是将基波潮流与谐波潮流无区别地进行统一求解,求解思路如图1所示,求解中,基波潮流方程以功率平衡方程形式计算,而各次谐波潮流计算则为电流平衡方程形式。整体迭代法计算结果理论上可以做到严格准确,但计算过程存在着计算量大、收敛困难等问题,该方法一般用于小规模系统,不适合大规模的谐波潮流计算。

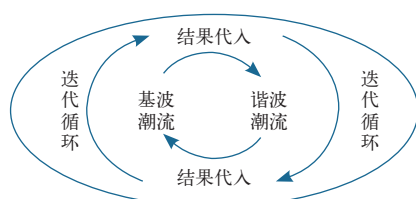


图1 整体迭代法

(2) 交替迭代法

交替迭代法^[9-10]巧妙地利用基波潮流与谐波潮流的特殊关系,将基波和谐波的潮流分开求解,再通过交替迭代将二者联合起来,而且反复交替迭代直至满足计算准确度,求解思路如图2所示,求解过程:①在忽略谐波的情况下,计算基波潮流;②在求得的节点基波电压基础上,进行谐波潮流计算;③获得节点谐波电压后,计及谐波对基波的影响,重新计算基波潮流;④重复循环②、③步骤,直至满足收敛条件。该方法与整体迭代法相比,计算效率虽有所提高,但由于考虑

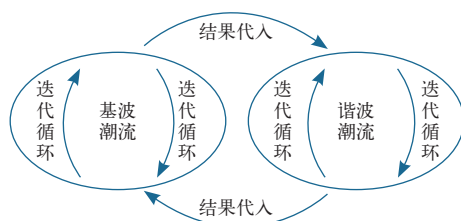


图2 交替迭代法

基波潮流与谐波潮流间的耦合关系,仍然存在计算量大、收敛困难等问题。

(3) 解耦法

电力系统中,一般谐波相对基波数值微小,所以基波潮流基本不受谐波潮流影响。解耦法^[11]利用这一点,简化求解,求解思路如图3所示。其中,基波潮流计算不再考虑谐波潮流的影响,省略二者间的交替迭代过程,因此实现基波潮流与谐波潮流的完全解耦。该方法相比交替迭代法计算准确度较差,但其减小了计算量,提高了计算速度,收敛较为可靠,适用于大规模系统的谐波潮流计算,也是目前运用较多的方法。

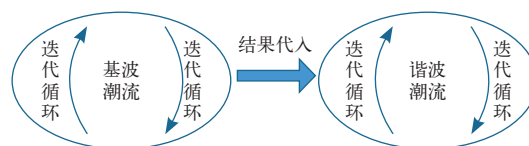


图3 解耦法

(4) 简单求解法

简单求解法^[12]对解耦法中谐波潮流迭代部分进一步简化,电网中对节点注入谐波电流影响的关键是基波电压,所以将各次谐波的迭代过程进行省略,求解过程如图4所示。简单求解法以牺牲计算准确度为代价,换取了计算效率以及收敛性能,且程序设计简易,所以其也是目前运用较多的一种方法。

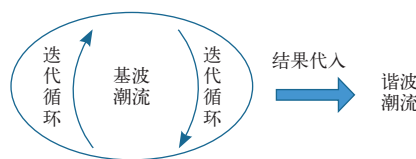


图4 简单求解法

2 不确定性谐波潮流计算概述

进入21世纪以来,以太阳能和风能等为代表的新兴能源大规模并网,不仅导致电网中的谐波大量增加,而且其间歇性和随机性的特点对传统电网形成了新的挑战。同时,电动汽车、主动配电网以及微网等新概念的发展,导致电源、负荷

与电网之间的互动性极大增强^[13]，其结果显著增加了电力系统的不确定性因素，传统的确定性谐波潮流算法已经很难满足当今电网谐波潮流分析的需要。因此，不确定性谐波潮流计算的研究受到广泛关注。

为处理不确定性因素的影响，求解时根据不确定性信息特点，选取合适的处理方法，利用不确定变量表征不确定性信息，实质即将不确定性信息转化为确定变量（如模糊数、区间数等）进行谐波潮流计算。其一般计算流程如图5所示。

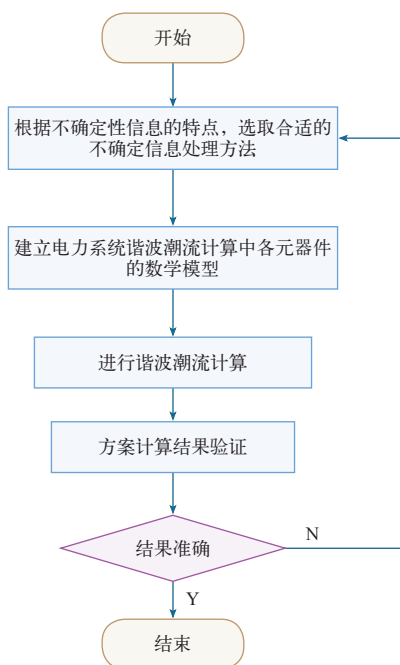


图5 考虑不确定性的谐波潮流计算流程图

不确定性谐波潮流计算方法相比于传统的确定性谐波潮流计算而言，其表征内容更为丰富、准确，更符合谐波潮流研究实际需要。不确定性谐波潮流计算的核心是如何处理不确定性信息，目前主要有三类不确定性谐波潮流算法：概率潮流法、模糊潮流法和区间潮流法。

3 概率潮流法

1974年，Borkowaka提出了概率潮流法^[14]，该方法有效地解决了具有随机特性的不确定性因素对系统潮流的影响，随后海内外学者对概率潮流法进行了研究与发展，得到了丰硕的研究成果。

概率潮流法（又称随机潮流法）^[13]将负荷功率和系统元件随机故障等不确定性信息作为输入随机变量，基于概率数学理论，利用输入随机变量的概率特征值进行谐波潮流计算，结果得到节点电压及功率损耗等系统状态变量的期望、标准差及概率密度和累积分布函数等，因此概率潮流法较传统潮流算法能更全面和准确地描述电力系统中随机性因素对潮流分布的影响^[15-17]。概率潮流法大致可分为：模拟法、近似法和解析法，下文将做简要介绍。

1) 模拟法通过建立与不确定性因素拟合程度高的概率分布模型，利用该模型进行随机抽样，对随机抽样的样本进行确定性潮流计算，最后根据随机样本计算结果统计出潮流的概率分布特征，理论上，模拟法将随着抽样样本数量的增加而无限接近准确值。模拟法有如：蒙特卡洛模拟法^[18-20]、重要抽样法^[21-22]、拉丁超立方采样法^[23-24]以及拟蒙特卡洛方法^[25-26]等。在配电网潮流中，针对光伏电源随天气变化而具有的不确定性，文献[20]基于蒙特卡洛模拟法，对含有光伏电源的配电网潮流计算进行研究，在建模方面，作者对并网的光伏电源输出功率采取了逐时随机模拟的方法，并构建更符合现实情况的时变负荷模型。

2) 近似法将输入随机变量近似为拟合程度较高的概率分布模型（如正态分布、均匀分布等），利用近似概率特征值进行潮流计算，所得结果可近似为真实值。该方法避免了大规模的抽样及反复的样本潮流计算，因而提高了计算速度，且其能够得到系统输入变量之间的相关性信息，因而更具研究价值。近似法如：点估计法^[27-28]、一次二阶矩法^[29]和状态变换法^[30]等。因风力发电设备具有间歇性和随机波动性的特点，文献[28]针对设备并网时注入的谐波电流幅值和相位具有不确定性的情况，提出了一种基于 $2m+1$ 点估计法的谐波概率潮流分析方法，其利用样本数据的高阶矩来构造估计点，用点估计法得出电网谐波电流的期望、方差等概率特征值，进而得出电网谐波潮流分布情况。该方法通过实际电网算例证明，其在保证计算准确度的同时提高了计算速度，是一种

有效、可行的概率潮流计算方法。

3) 解析法^[31]利用输入随机变量间的关系,利用卷积计算得到状态变量的概率分布,其重点是如何处理复杂卷积计算,卷积处理技术有:半不变量法、快速傅里叶变换等。考虑DG并网的运行特性,文献[31]应用解析法,采取了半不变量法和Gram-Charlier级数展开的方法进行谐波潮流计算研究,利用半不变量的基本性质处理卷积运算,文中对该方法计算过程进行了详细地介绍,并与蒙特卡洛算法计算结果进行比较分析,验证其有效性。

概率潮流法考虑了系统不确定性因素的随机特性,利用概率理论对不确定性信息进行描述,使潮流计算结果更贴合实际电网的运行状态,但概率潮流法计算数据庞大(如模拟法需要大量有效的统计数据做支撑)、计算复杂,且典型的概率分布函数不能准确描述所有随机特性。

4 模糊潮流法

对于现实中存在的一些不具有随机特性、含糊不清的信息,模糊集理论是这类不确定性信息很好的处理工具。1978年,Zadeh提出了模糊集理论^[32],随后基于模糊集理论的电力系统模糊潮流算法被提出并被优化^[33-34]。模糊潮流算法是基于模糊集理论来描述系统输入变量的模糊性,即以模糊变量代替输入随机变量,应用模糊数进行潮流计算,以此得出节点谐波指标以及网络潮流模糊性分布。

模糊潮流法(又称模糊数学法)^[35-39],其舍弃传统普通集合所描述的:元素或者子集属于或不属于(二者必选一个)某个特定集合的性质,表达出一种现实中普遍存在的“亦此亦彼”的现象,以隶属度来描述元素或者子集属于某个特定集合的程度。常见的模糊数:三角形模糊数与梯形模糊数。

三角形模糊数如图6所示。图6中 a_2 为三角形模糊数 $u_{a(x)}$ 的中心值, a_1 、 a_3 分别为模糊数的左右边界,模糊隶属函数 $u_{a(x)}$ 描述元素或者子集属于特定集合的程度。 $u_{a(x)}$ 的隶属函数为

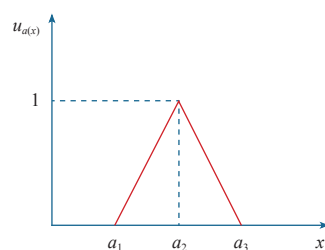


图6 三角形模糊数

$$u_{a(x)} = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & x > a_3 \end{cases} \quad (1)$$

梯形模糊数,如图7所示。

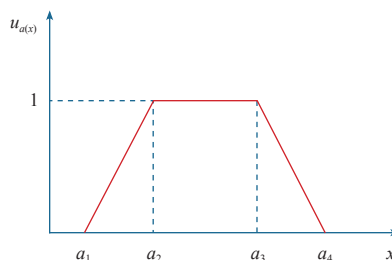


图7 梯形模糊数

图7中, $x=(a_1, a_2, a_3, a_4)$,其含义: x 不会小于 a_1 或大于 a_4 ,最有可能在 a_2 与 a_3 之间。 $u_{a(x)}$ 的隶属函数为

$$u_{a(x)} = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1 & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3} & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0 & x > a_4 \end{cases} \quad (2)$$

在文献[40]中,作者根据双馈风机并网的谐波特性,对配电网进行基波和谐波潮流节点模糊建模,采用前推回代法进行模糊谐波潮流计算,并通过33节点典型辐射型配网进行仿真验证。在电网规划中,针对预测负荷与发电机出力存在不确定性,文献[41]应用了模糊潮流法对其进行分析,文中以三角模糊数为例,介绍了模糊集理论的基

本概率,给出了用模糊数描述节点注入功率不确定性时的模糊直流潮流求解方法及步骤,并通过6节点算例进行分析。

模糊潮流法能有效解决不具有统计性质、模糊不清的不确定性问题,相比确定性潮流计算,可以为研究人员提供更丰富的电网潮流分布信息,但模糊潮流在细致描述不确定性因素影响的同时也使潮流计算复杂化,使计算量大大增加。

5 区间潮流法

当不能获知节点功率和系统状态等的准确数据,但可以确定其包含在某个区间范围内时,区间潮流法^[42-43]是求解这类不确定性信息的好方法。R. E. Moore于1966年提出了用区间变量代替确定变量进行数学运算^[44],以此创立了区间数学分析方法,随后该理论被应用于电力系统潮流计算中,并发展出区间潮流法。区间数学简要介绍如下。

对于给定的实数对 $x_1, x_2 \in R$,若满足条件: $x_1 \leq x_2$ 。则闭有界数集合 X 为

$$X = [x_1, x_2] = \{x \in R | x_1 \leq x \leq x_2\} \quad (3)$$

式中, $[x_1, x_2]$ 为有界闭区间, x_1 为区间 X 的下界点, x_2 为区间 X 的上界点。

若区间 X 的上界点与下界点相等,即 $x_1 = x_2$,定义 $X = [x_1, x_2]$ 为点区间。 R 上所有闭界区间的集合,记为 $I(R)$ 。关于区间数学运算法则,详细内容可参考文献[42-44]。

区间潮流法(又称区间分析法)^[45]利用区间数学方法描述输入随机变量的不确定性,因为不确定信息通常会在一定范围内准确,即不确定数值在某一区间内是确定的,因此在潮流计算中,利用确定的区间数代替不确定变量,潮流计算结果必然也在某个区间内,从这个角度来看待区间潮流法,其对于求解不确定性谐波潮流是非常适用的。

为解决电网中的不确定性潮流问题,文献[46]提出一种基于区间算法的约束潮流算法,求解过程中,引入了区间的可比性概念,将不确定性潮流计算问题分解成两个确定性的潮流计算,称为上界子问题和下界子问题。通过上、下边界值进

行潮流计算,结果为潮流解的区间范围。该算法计算原理简单、计算速度快且收敛性好。关于区间潮流法在复杂情况下的应用,文献[47]对其进行相关介绍,文中运用区间数学方法处理配网潮流中的不确定性因素,针对情况复杂的配网,作者提出一种配电网三相潮流计算的区间算法,该算法能够准确得到系统潮流解的区间范围,有效解决潮流中的不确定性问题。

区间潮流法虽然可以完全包含不确定性潮流计算的所有可能性结果,但同时区间潮流法也存在着使问题过于简单化的缺点,经过区间潮流计算,所得结果的区间范围往往远超实际范围,尤其在较大系统中,多次区间运算的累积,常常会导致“误差爆炸”现象,使得计算结果毫无用处。

6 结束语

随着电力系统中谐波含量以及不确定性因素的增加,不确定性谐波潮流计算逐渐成为研究热点之一。考虑不确定性的谐波潮流计算与传统的确定性谐波潮流计算相比,其本质区别在于输入变量的不确定性,其目的在于更真实地描述电网中不确定性因素对谐波潮流的影响。

通过分析现有的研究成果,本文认为考虑不确定性的谐波潮流计算有以下几个研究发展方向。

1)当前的不确定性信息处理方法并不能准确描述所有不确定性信息,如何形成可准确描述的处理方法具有很大的研究空间,如采用云模型等方法描述不确定性信息。

2)特性各异的新能源大规模并网趋势下,区域内新能源功率输出进行交互影响,其相关性成为研究热点。

3)不确定性谐波潮流算法在复杂的工程应用中,如何在保证潮流计算准确度的同时提高计算效率是研究方向之一,如尝试并行计算来提高计算效率。

4)电力体制改革在逐步深入,在竞争的电力市场机制下,电源和负荷具有开放性特点,基于

市场特征和需求响应的不确定性谐波潮流计算具有重大研究意义。

参考文献

- [1] 文俊, 涂大石. 对负载与谐波及电能计量问题的分析[J]. 电测与仪表, 2000, 51(18): 12-14.
- [2] 杨帆, 李晓明, 郑秀玉, 等. 电力系统分数次谐波的产生机理、危害与特征[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 153-156.
- [3] Chun Li, Wilsun Xu. On the ambiguity of defining and measuring inter-harmonics[J]. Power Engineering Review, IEEE, 2001, 21(7): 56-57.
- [4] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊1): 346-351.
- [5] 韦钢, 吴伟力, 胡丹云, 等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40.
- [6] 陈根永, 金照盈, 姜燕, 等. 郑州轨道交通供电系统谐波分析及影响研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(20): 43-48.
- [7] Lo K L, Goh K M. Harmonic analysis for power networks[J]. Electric Power Systems Research, 1986, 10(3): 189-203.
- [8] 程浩忠, 廖培鸿. 电力系统谐波潮流的降维计算方法[J]. 电力系统自动化, 1996(1): 20-22.
- [9] Smith B C, Arrillaga J, Wood A R, et al. A review of iterative harmonic analysis for AC-DC power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 180-185.
- [10] 李庚银, 徐春侠, 王勇, 等. 含牵引负荷的电力系统三相不对称谐波潮流计算[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 60-62.
- [11] 潘云江, 赵书强, 陈斌发, 等. 电力系统不对称谐波潮流的一种实用计算方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 60-62.
- [12] Pileggi D J, Chandra N H, Emanuel A E. Prediction of harmonic voltages in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981(3): 1307-1315.
- [13] Borkowska B. Probabilistic load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(3): 752-759.
- [14] Oke Oluwabukola A, Thomas David W P. Probabilistic load flow in microgrid assessment and planning studies[C]. IEEE Electrical Power and Energy Conference, October 10-12, 2012, London, Britain: 151-156.
- [15] 颜秉超. 考虑电网中不确定因素的谐波潮流计算[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- [16] 李忠耀, 张一中. 电力负荷的随机谐波模型[J]. 成都科技大学学报, 1992(5): 67-72.
- [17] 高元海, 王淳. 基于全概率公式的含风电配电系统概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 327-334.
- [18] Li J F, Zhang B H, Liu Y F. Data mining in nonlinear probabilistic load flow based on Monte Carlo simulation[C]. Proceedings of 1st International Conference on Information Science and Engineering, December 26-28, 2009, Nanjing, China: 833-836.
- [19] 丁明, 吴兴龙, 陆巍, 等. 含多个不对称光伏并网系统的配电网三相潮流随机计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 47-52.
- [20] 邓威, 李欣然, 徐振华, 等. 考虑风速相关性的概率潮流计算及影响分析[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 45-50.
- [21] Zhou B, Xiao Q. Solving probabilistic optimal power flow problem using quasi Monte Carlo method and ninth-order polynomial normal transformation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 300-306.
- [22] Hajian M, Rosehart W D, Zareipour H. Probabilistic power flow by Monte Carlo simulation with Latin supercube sampling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1550-1559.

- [23] Mckay M D, Beckman R J, Conover W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 1979, 21 (2) : 239-245.
- [24] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 采用拉丁超立方采样的电力系统概率潮流计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (21) : 32-35.
- [25] Huang J, Xue Y S, Dong Z Y, et al. An adaptive importance sampling method for probabilistic optimal power flow [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, Detroit, USA.
- [26] 宋晓通, 谭震宇. 改进的重要抽样法在电力系统可靠性评估中的应用 [J]. 电网技术, 2005, 29 (13) : 56-60.
- [27] Hong H P. An efficient point estimate method for probabilistic analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 59 (3) : 261-267.
- [28] 余光正, 林涛, 徐遐龄, 等. 基于 $2m+1$ 点估计法的考虑风力发电接入时电力系统谐波概率潮流算法 [J]. 电网技术, 2015, 39 (11) : 3260-3265.
- [29] Li X, Li Y Z, Zhang S H. Analysis of probabilistic optimal power flow taking account of the variation of load power [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (3) : 1045-1054.
- [30] 刘艳丽. 随机潮流中正态变量线性变换不变性定理应用的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [31] 盛美卫. 考虑分布式电源谐波随机性的随机谐波潮流计算 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [32] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1 (1) : 3228.
- [33] Bijwe P R, Raju V G K. Fuzzy distribution power flow for weakly meshed systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4) : 1645-1652.
- [34] 陈得治, 郭志忠. 配电网模糊匹配潮流状态估计方法分析 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (13) : 34-39.
- [35] 张焰, 谈伟. 模糊潮流计算方法研究 [J]. 电工电能新技术, 1999, 18 (3) : 1-8.
- [36] Miranda V, Saraiva J T. Fuzzy modeling of power system optimal load flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7 (2) : 843-849.
- [37] 张焰, 陈章潮. 计及不确定性的模糊交流潮流计算方法研究 [J]. 电网技术, 1998, 22 (2) : 20-22.
- [38] Das D, Ghosh S, Srinivas D K. Fuzzy distribution load flow [J]. Electric Machines and Power Systems, 1999, 27 (11) : 1215-1226.
- [39] Feijoo A E, Cidras J. Modeling of wind farms in the load flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15 (1) : 110-115.
- [40] 吴杰, 颜秉超, 梁婷婷. 含双馈风机的配电网模糊谐波潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (12) : 72-76.
- [41] 张焰, 陈章潮. 电网规划中的模糊潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (3) : 24-27.
- [42] 裴爱华, 刘明波, 张弛. 考虑负荷不确定性的区间潮流计算方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (6) : 24-27.
- [43] Wang Z, Alvarado F L. Interval arithmetic in power flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7 (3) : 1341-1349.
- [44] Moore Ramon E. Interval analysis [C]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 1966.
- [45] 韩亮. 计及间歇式电源不确定性的电力系统区间-仿射分析方法 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [46] 汪超群, 韦化, 鲍海波, 等. 基于区间不确定性的约束潮流 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (20) : 72-77.
- [47] 王成山, 王守相. 基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (3) : 58-62.

(收稿日期: 2016-03-16) **EA**