

智能算法在含分布式电源配电网故障恢复的应用综述

杨 珺^{1†}, 孔文康², 孙秋野¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 国网山东省电力公司 泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 分析含分布式电源的配电网故障恢复模型, 综述几种目前比较流行的智能算法在含分布式电源配电网故障恢复问题中的应用及优缺点, 并对整合不同算法后的组合智能算法在含有分布式电源的配电网故障恢复中的优化效果进行比较; 针对当前能源局势与输配电要求日益提高的情况, 分析智能算法在考虑多目标含分布式电源配电网故障恢复中的应用; 最后, 对含分布式电源的配电网故障恢复问题发展趋势进行展望。

关键词: 配电网; 分布式电源; 故障恢复; 智能算法

中图分类号: TM711

文献标志码: A

Application of intelligent algorithms to service restoration of distribution network with distributed generations

YANG Jun^{1†}, KONG Wen-kang², SUN Qiu-ye¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Taian Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Taian 271000, China)

Abstract: This paper analyzes the service restoration models of distribution network with distributed generations (DGs), and summarizes the developed intelligent algorithms and the hybrid intelligent algorithms in the application of service restoration of distribution network containing DGs. Aiming at the current energy situation and requirements of the growing situation, the role of multi-objective intelligent algorithms is analyzed in service restoration. Finally, the trend of service restoration of distribution network with DGs is discussed.

Keywords: distribution network; distributed generations; service restoration; intelligent algorithms

0 引 言

配电网故障恢复^[1-4]是当配电网产生永久性故障后,根据故障定位和隔离的情况,采用适当的故障恢复策略改变配电网的拓扑结构以达到非故障停电区域恢复供电的目的,即改变配电网的联络开关及分段开关的开关状态,将非故障停电区域与当前配电网其他健康运行的馈线连接,完成对配电网停电区域恢复供电的任务。

配电网接入大量的分布式电源 (distributed generation, DG) 之后,从原先的单源辐射网络结构变为双源甚至多源网络结构,运行方式将发生较大的改变。智能电网的建设使得传统的配电网故障恢复方法不再简单适用^[5-6]。研究配电网发生非故障断电后,利用具有孤岛运行能力的 DG,在保证重要负荷优先恢复供电的前提下最大限度地对非故障停电区域恢复供电策略,对于提高电力系统抗灾减压能力具有深

远意义^[7-11]。

目前,处理含 DG 配电网故障恢复问题的算法主要分为经典算法和智能算法。经典算法主要有最小生成树法^[11-12]、动态规划算法^[13-14]、混合整数规划法^[15]和启发式搜索方法^[16]等。这些方法得到的最优解不依赖于网络的初始结构,但对于大规模系统存在“维数灾”的问题,计算量大,效率低下,对于求解故障恢复问题存在较大的局限性^[17]。随着配电网自身的不确定因素增加以及各种优化理论的日趋完善,基于随机搜索策略的智能算法因其具有较好的并行处理能力以及全局收敛特性,正逐渐取代经典算法,成为解决含 DG 配电网故障恢复问题更实用的工具^[18]。

本文首先分析含 DG 的配电网故障恢复模型;然后,综述含 DG 配电网故障恢复所采用的各种智能算法及其组合智能算法,并分析各种智能算法的特点;最后,结合现阶段智能电网的发展状况,展望了含 DG

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2019-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61773099).

责任编辑: 巩敦卫.

[†]通讯作者. E-mail: yangjun@mail.neu.edu.cn.

的配电网故障恢复问题的研究趋势。

1 含DG配电网故障恢复模型研究现状

含DG配电网故障恢复是一个多目标、多维数、多约束、多时段非线性的组合优化问题,是NP难问题的一种^[19]。目前,已有大量针对含DG配电网的故障恢复问题建立的数学模型,这类模型一般是由目标函数与约束条件构成的复杂的单目标或多目标数学规划模型。含DG配电网的故障恢复要求在满足一系列的配电网运行约束条件下,需要尽可能地实现停电区域内负荷恢复量的最大化,同时保证恢复方案的切实可行^[20]。

1.1 目标函数

关于含DG配电网的故障恢复的目标函数主要有以下3种。

1) 以停电负荷总功率最小为目标,是配电网故障恢复首要考虑的,已在故障恢复数学模型中被广泛采用,即

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^X P(i)_{\text{cut}}. \quad (1)$$

其中: $P(i)_{\text{cut}}$ 为故障恢复后停电负荷节点*i*的有功功率, X 为故障恢复后停电负荷节点总数。

2) 以开关操作次数最少为目标,即

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^K T(k). \quad (2)$$

其中: $T(k)$ 表示第*k*个开关是否闭合,若闭合则 $T(k) = 1$,否则 $T(k) = 0$; K 为所有开关个数。

3) 以有功功率网损最小为目标,即

$$\min f_3 = \sum_{n=1}^N T(n)r_n \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2}. \quad (3)$$

其中: $T(n)$ 为开关状态,若闭合则 $T(n) = 1$,否则 $T(n) = 0$; n 为配电网支路编号; N 为配电网支路总数; r_n 为支路*n*的电阻值; P_n 为配电网第*n*条支路的有功功率; Q_n 为配电网第*n*条支路的无功功率; U_n 为配电网第*n*条支路末端的节点电压。

此外,特殊情况下还存在一些其他辅助的优化目标,如:以供电经济性最佳为目标、以DG出力最大为目标、以形成的孤岛数目最少为目标、以馈线的负载率最小为目标、以节点电压的稳定性指标最大为目标、以孤岛静态稳定裕度指标最大为目标等,也被用于含DG配电网故障恢复中的特定问题的优化中。

1.2 约束条件

约束条件主要分为静态安全运行约束和孤岛运行约束。现有研究中普遍考虑的约束条件为配电网

的静态安全运行约束,主要包括拓扑结构约束、功率平衡约束、支路容量约束、节点电压约束等。这些约束是配电网故障恢复所必须满足的必要性约束^[20]。而对于孤岛运行约束主要有以下3种。

1) 孤岛内必须含有至少一个DG具有黑启动能力且具有稳定输出功率,其他不满足条件的DG不能在孤岛内单独运行,必须划入运行能力较好的孤岛中。

2) 孤岛内DG提供的功率必须大于孤岛内负荷消耗的功率,即

$$\sum_{k=1}^M P_{Dk} - \sum_{i=1}^N P_{Li} > 0. \quad (4)$$

其中: M 为孤岛内DG的数量, P_{Dk} 为第*k*个DG可提供的有功功率, N 为孤岛内负荷节点的总数, P_{Li} 为第*i*个负荷节点的有功功率。

3) 稳定运行的孤岛要求线路和变压器负载电流不超限,母线电压不超限。

对于考虑负荷可控性的含DG配电网的故障恢复问题,还需要在上述约束条件的基础上继续引入对可控负荷的相关约束。

2 智能算法在含DG配电网故障恢复中的应用

2.1 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)作为进化算法的一种,已成为解决搜索问题的通用算法。算法的原理是根据达尔文的生物进化论和孟德尔的遗传定律模仿生物基因进化过程,其中包括基因的选择、交叉、变异等环节,最终寻找到种群的最优个体。主要优点是无限定目标函数是否可导或连续,全局寻优性出众,能够根据问题的属性自动调整搜索方向,并且对多变量、多约束和离散变量等优化问题具备较强的处理能力。

遗传算法对于求解含DG配电网的故障恢复问题具有良好的收敛性,而且有着较强的全局寻优能力。作为一种随机寻优的方法,能够有效地解决含DG的配电网的故障恢复这类函数优化和组合优化问题^[21-25]。

文献[21]考虑DG的运行方式,采用改进遗传算法编码方式对所建立的含DG的配电网故障恢复模型进行求解,并采用网络基本环路的拓扑选择机制进行计算。算法通过对基因组进行深度编码,改进不可行解的修复手段来搜索最优个体,提高了算法的搜索效率。

文献[22]针对传统遗传算法容易产生许多不可

行解的问题引进了合作型协同进化遗传算法,将初始解分为几个子种群,每个种群单独进化,并且每个子种群的进化方向是动态的.在算法的寻优过程中,各个子种群随时对各自的染色体进行更新,彼此交换信息.多个子种群同时进化,提高了算法的优化收敛速度和效率,使故障后的配电网能快速恢复供电,降低了因决策变量急剧增加而造成系统优化问题的复杂度,简化了搜索空间,提高供电质量.

文献[23]结合配电网的网络结构和故障后孤岛的主从控制模式,对遗传算法中的染色体定义了基因组和基因子块的概念,对含DG的配电网供电恢复模型进行求解,并采用基于基因组的思想控制个体交叉和变异操作,显著减少不可行解的数量,避免了早熟,提高了算法的收敛性和实时性,从而满足配电网故障恢复的实时性需求.

2.2 蚁群算法

蚁群算法(ant colony optimization, ACO)与遗传算法一样,也是一种模拟进化算法.1992年,意大利学者Marco Dorigo根据蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为首先提出了蚁群算法.算法的原理是,蚂蚁在寻找食物的过程中通过“信息素”标识路径,并通过“信息素”与其他蚂蚁交换信息,当一条路径上“信息素”吸引的蚂蚁越来越多时,其他剩余蚂蚁选择这条路径的概率大大增加,最终得到最优路径.蚁群算法是一种搜索能力很强的智能算法,它引进了分布式计算、正反馈机制和贪婪式搜索机制.分布式计算的作用是防止算法陷入早熟收敛;正反馈机制的作用是使算法能够及时发现较优解;贪婪式搜索机制的作用是使算法在早期搜索过程中找出可行的解,缩短搜索时间.

蚁群算法思想简单、易于实现,具有较强的鲁棒性、较高的搜索速度和稳定性,是有效解决含DG的配电网故障恢复这类复杂非线性优化问题的方法之一.[26-31].

文献[26]通过改进蚁群算法来求解故障条件下含DG配电网的重构与孤岛划分问题.修改了传统蚁群算法的路径转移规则和信息素浓度更新规则,避免搜索陷入停滞,适应了含DG配电网孤岛划分与故障恢复等可行解解集较大问题的求解.

文献[27]采用基于生成树策略的改进蚁群算法来寻找配电网故障后供电恢复的最佳路径.生成树策略保证了算法搜索过程中蚂蚁个体寻找的路径都满足配电网辐射性的约束条件,从而提高可行解的数量;同时,为使每条路径都在可选择的范围内,每只蚂

蚁个体按照轮盘赌的方式选择路径,从而使得较优的路径被选择的概率大大增加.对于含光伏发电的配电网系统,采用改进蚁群算法生成可行的故障恢复网络,既缩小了寻优空间,又能保证恢复尽可能多的非故障停电负荷,加快收敛速度,降低网损.

文献[28]为解决含DG的配电网故障恢复问题,将蚁群分为数目相同的几组,设置每组蚁群单独寻找最优路径,并将最后得到的几组最优路径按照平方和相加,使算法更容易跳出局部最优解;对原来搜索路径转换选择方式修改为轮盘赌方式,从而使蚁群的搜索范围扩大,更快速地寻找到最优供电恢复方案.

2.3 粒子群算法

1995年,Kennedy和Eberhart通过研究鸟类群体捕食活动提出一种新的进化算法——粒子群算法(particle swarm optimization, PSO).算法的原理是通过模仿和类比鸟类群体的觅食,将鸟类群体的飞行空间视为待解决问题模型的搜索空间,并把每只鸟抽象地比作算法中的每个粒子,每个粒子代表待解决问题模型的一个可行解,将寻找问题最优解的过程比作鸟类群体通过个体之间的协作和信息共享来寻找食物的过程,进而求解繁琐的工程优化问题.

粒子群算法作为一种全局性随机搜索算法,程序简单易行、收敛速度快、搜索范围大,但考虑到配电网要求满足闭环设计、开环运行,粒子群算法在搜索过程中会产生大量不满足拓扑约束的解,降低搜索速度,并且只有正反馈机制,局部寻优能力较差,对离散化问题处理不佳,对其进一步改进可有效解决含DG的配电网故障恢复问题[32-36].

文献[32]针对含DG的配电网故障恢复问题采用了改进二进制粒子群算法.算法建立了考虑DG随时间变化的动态模型,将拓扑识别加入改进算法用以消除环网和避免孤岛,保证配电网为辐射状,排除大多数不可行解.同时,算法还提出了最优故障恢复路径策略和枚举组合法,能够快速准确地输出含DG的配电网故障恢复问题的最优解.

文献[33]通过改进学习因子和惯性权重来解决传统粒子群算法收敛速度慢、容易早熟的缺点.令学习因子 c_1 与 c_2 相等以保证粒子接近全局最优点;令惯性权重 ω 随着迭代次数的增加而非线性递减以提高搜索效率.采用改进粒子群算法及分层运行方式对含DG配电网进行故障恢复,可以减少不必要的搜索,大大提高了寻优速度.

文献[34]针对基本粒子群算法容易早熟和搜索速度慢的问题,将粒子群算法分为3个不同的状态:

自由搜索状态、精度搜索状态、跟踪搜索状态。首先,将爬山算法中的自由搜索思想融入粒子寻优过程中,使得搜索范围更广;如果算法寻优过程陷入局部最优,则采用跟踪搜索;最后,为了提高粒子群算法的搜索速度,采用精度搜索状态。改进粒子群算法大大提高了含DG配电网非故障失电区的恢复供电的效率。

2.4 其他新型智能算法

目前,除上述几种常用的智能算法外,人工蜂群算法(artificial bee colony, ABC)^[37]、免疫算法(immune algorithm, IA)^[38]、细菌群体趋药性算法(bacterial colony chemotaxis, BCC)^[39]、多智能体系统(multi-agent system, MAS)^[40]、和声搜索算法(harmony search, HS)^[41]、膜计算算法(membrane computing, MC)^[42]、差分进化算法(differential evolution algorithm, DE)^[43]等新型智能算法已用于解决含DG的配电网故障恢复问题。这些算法将故障恢复方案优化求解过程中庞大的计算量进行了有效拆解,特别适用于大规模的含DG的配电网故障恢复优化计算。这在一定程度上丰富了解决含DG配电网故障恢复问题的方法,有效推动了智能算法在故障恢复领域的进步和发展。

文献[37]针对蜂群算法收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点,提出了一种改进人工蜂群算法以解决含DG配电网的故障恢复问题。算法中令跟随蜂依据适应度排序的选择策略来选择要跟随的蜜源位置,增强了寻优多样性,防止了种群早熟;令侦查蜂在重新搜索新的蜜源位置时动态地改变历史解的邻域结构以拓展结构集的搜索范围。应用改进人工蜂群算法对含DG配电网进行寻优,能够使全部的非故障停电负荷恢复供电,体现了很好的实用性。

文献[38]提出了一种多智能体免疫算法以解决故障后微网的孤岛划分和供电恢复问题。算法对抗体采用随机生成树的方式编码以消除计算过程中的大量不可行解,缩小可行解的空间;对抗体还采用高频变异的方式进行变异以加快收敛速度;对抗原采取动态改变的方式同样加快了算法的收敛。多智能体免疫算法能在微网故障后尽快计算出供电恢复方案,有效提高了生产和生活效率。

文献[39]建立了多故障分阶段、分层抢修与恢复模型以解决含DG配电网故障恢复问题。采用二进制细菌群体趋药性算法对外层优化模型进行求解,引入独立故障支路概念,增强了算法寻优的突出性。采用改进蚁群算法对内层优化模型进行求解,更快地找到阶段全局最优解。内外层优化模型相互配合,相互影

响,提高了算法的有效性和快速性。

智能算法虽然在一定程度上弥补了经典算法在解决含DG配电网故障恢复问题时存在的不足,但其算法自身的缺陷也容易在优化过程中被放大。所以,对于组合智能算法的研究已引起人们的广泛关注。

3 组合智能算法在含DG配电网故障恢复中的应用

为了弥补单个智能算法在寻优过程中的先天不足,组合智能算法应运而生。组合智能算法将两种甚至多种不同的智能算法按照一定的策略进行有机结合,彼此取长补短,优势互补,实现了方法寻优能力的提升。应用组合智能算法解决含DG配电网故障恢复问题可以改善单个算法性能,进一步提高恢复效率,缩短供电恢复时间,非常具有实用价值^[44-48]。

文献[44]将全局寻优能力较强的二进制粒子群算法与收敛速度较快的二进制差分进化算法相结合,形成二进制混合算法,既克服了二进制粒子群算法容易早熟的缺点,又弥补了二进制差分进化算法容易陷入局部最优的缺陷。提出了一种能使配电网孤岛划分和故障重构相互配合的恢复策略,并应用二进制混合算法对配电网故障重构和孤岛划分进行寻优计算。为判断故障重构时是否有孤岛产生而建立一个孤岛界限矩阵,在构造目标函数时加入孤岛划分后得到的停电负荷,使孤岛划分和故障重构的结果共同影响全局寻优,增强了这两种恢复方法的整体性。

文献[45]针对传统粒子群算法容易陷入局部最优和搜索速度缓慢的问题,将杂草算法融入到粒子群算法中,同时,对算法粒子的位置更新方式进行了改进。对含DG的配电网首先采用深度优先算法进行孤岛划分,在此基础上使用杂草粒子群算法对剩余配电网进行故障恢复,所得可行解不仅使配电网开关操作次数最少,而且在电气角度也使网损相对最小,具有一定的工程价值。

文献[46]在配电网供电恢复过程中根据DG的类型和运行方式,将不能并网的DG进行分层孤岛运行,最大程度地利用DG缩小停电区域,并利用多智能体遗传算法寻找最优恢复路径。所有的智能体都固定在多智能体遗传算法构造的环形网格中,将智能体作为遗传算法中的染色体进行竞争操作和自学习行为,使算法能够快速全局收敛,跳出局部最优,找到全局最优解。采用改进的基于环路分解的方法来解除算法运行过程中产生的不可行解,大大提高了寻优效率。这种组合算法增强了遗传算法的学习能力,达到较好的寻优效果。

综合来看,含DG的配电网故障恢复优化求解需要先进的、快速的、可靠的智能算法的支撑,改进的智能算法及其组合智能算法能够在故障恢复模型求解过程中很好地兼顾快速性和全局最优性,显著提高故障恢复效率,减少因非故障停电造成的损失。

4 智能算法在考虑多目标含DG配电网故障恢复中的应用

本文从智能算法入手,研究其在含DG配电网故障恢复中的应用。在DG接入配电网早期,鉴于DG在配电网中所占的比重不是很大,解决含DG配电网故障恢复问题主要以单一智能算法为主。近年来,国家越来越重视对可再生能源的并网应用,大量DG接入配电网,使配电网故障恢复问题复杂维度增加,优化性能更佳的组合智能算法也代替了传统单一智能算法,已成为学者研究的重点。含DG的配电网故障恢复问题归根结底是寻找配电网的最优拓扑结构,而最优拓扑结构一般由目标函数来决定,因此,目标函数的选择将直接决定故障恢复的效果。随着时代的进步,配电网的供电质量越来越高,人们也越来越关注配电网的安全性和经济性。对于含DG配电网故障恢复模型中目标函数的选择,也由单一目标向更加符合实际问题需求的多目标函数转变。

除了考虑供电质量的单目标配电网故障恢复以外,还应将供电经济指标以及运行稳定性等更多目标包括在内。智能算法在解决复杂模型的问题尤其是考虑多目标的复杂模型问题方面具有很大的优势,因此,在解决含DG配电网故障恢复中显示了其必要性^[49-53]。

文献[49]采用二进制粒子群算法,引入Pareto最优,根据不同的要求分别综合考虑停电负荷最小优先、开关动作次数最少之和负荷损失最小优先、网损最小次之作为供电恢复目标搜索Pareto非支配解,避免求解过程中出现实际参考价值不大的Pareto非支配解。通过计算网损和开关动作次数选择非劣解,降低模型的负荷损失、开关动作次数以及网络损耗,实现最优故障恢复策略。

文献[50]综合考虑光伏以及风机出力的不确定性,提出了一种基于改进的NSGA-II算法求解考虑DG出力随机性的配电网故障恢复问题。建立基于机会约束规划的故障恢复模型,以综合失电负荷最小和有功网损最小为目标函数,通过采用改进NSGA-II算法使主网停电负荷随着目标函数的解动态恢复,可以有效避免故障恢复计算过程中的局部最优解,协调主网供电恢复与DG孤岛运行。

文献[51]针对含柔性软开关(soft open point, SOP)的有源配电网,建立综合考虑失电负荷加权值最小、孤岛运行DG最少以及网损最小的多目标函数,并通过设定SOP的出口电压和联络开关状态为优化变量,分别通过混沌算法以及蚁群算法对多目标函数进行求解。基于混沌-蚁群联合算法,对含柔性软开关的配电网故障恢复重构模型进行全局寻优,在较短时间内得到更理想的最优解。

5 含DG配电网故障恢复问题策略分类

在现有的含DG配电网的故障恢复研究中,所采取的故障恢复策略主要可分为两大类:孤岛划分策略^[15,47]和综合故障恢复策略^[54-55]。

1) 孤岛划分策略是指配电网发生故障后,利用故障点下游非故障停电区域中的DG形成计划孤岛继续运行,恢复对非故障负荷供电的策略。孤岛划分问题应综合考虑电气安全约束、网络损耗、负荷的重要程度及恢复量等因素,所以DG孤岛划分问题也是一个NP难问题,智能算法在解决此类问题上仍然具有优势。

2) 综合故障恢复策略是在含DG的配电网发生故障后,不仅能够利用DG形成计划孤岛快速恢复供电,还能够利用配电网的主网进行负荷转供。本文所述的智能算法及组合智能算法全部都应用在综合故障恢复策略下,对孤岛划分和剩余配电网重构进行优化计算,得出最终的配电网故障恢复优化结果。

6 含DG配电网故障恢复的发展趋势

近年来,微电网、源网荷互动、主动配电系统、能源互联网等一些新趋势逐渐成为国内外电力部门研究的重点。面对日益复杂的配电网,含DG的故障恢复问题因其变量繁多且类型复杂也变得困难重重,所以解决此类问题时需要全面综合地考虑^[56-57]。而智能算法特别是两种或两种以上算法的组合算法,在处理多变量模型时更具有实用性。另外,为了更好地满足人们日益增长的对电力系统经济性和稳定性运行的要求,多目标优化将成为未来电网故障恢复的发展趋势。下列几个方面的研究将会为智能算法在解决含DG配电网的故障恢复问题的发展带来新的机遇:

1) 能源互联网中含DG的故障自愈能力的研究相继开展。能源互联网是当今能源发展的大势所趋,由于能源互联网具有分布式故障、大延时、信息采集量大、数据维度大等特点,含DG的故障自愈问题与传统配电网故障恢复问题有很大的不同之处^[58-59]。基于智能算法的能源互联网故障自愈技术是未来电网技术人员研究的重点工作。

2) 主动配电系统的故障恢复研究势在必行. 主动配电网支持高占比可再生能源的灵活接入及消纳, 通过主动控制和主动管理, 实现多种能源协同优化, 可最大限度提升资产利用率和综合能源效率^[60]. 随着时代的进步, 主动配电网将成为能源互联网大框架下智能配电网的核心, 具有重要的研究价值和实际应用. 主动配电网中的风电、光伏等DG数量较多并且分布比较分散, 使得解决故障恢复问题必须依赖智能算法^[61]. 同时, 考虑DG间歇出力、潮流波动随机、储能以及可控性负荷^[62]等特征也是采用先进的智能算法解决主动配电网故障恢复问题, 提高电力系统安全稳定、经济可靠运行的有效途径^[63-64].

3) 源网荷互动和多微网互联能力在配电网故障恢复状况下至关重要. 未来电网中, 配电网发生故障后, 可以通过多微网互联供电进行黑启动, 恢复对重要非故障区域的供电^[65-66]; 也可以通过电源、电网和负荷之间的构成、响应和交互对电网的自愈能力提供强有力的支撑^[67-68]. 由于各微网之间存在微源特性、负荷特性、能源渗透率以及储能容量等差异, 源网荷互动和多微网互联能力的分析就显得尤为重要. 除此之外, 对互联系统的稳定控制、优化运行以及基于互联系统的配电网孤岛划分及故障恢复策略有待于深入研究^[69-70].

4) 电力大数据、云计算等关键技术将智能电网故障恢复技术的发展推向新的阶段. 大数据的发展为智能电网注入了新的活力, 掌握电力大数据的关键技术对电力行业的可持续发展和坚强智能电网的建立具有重要意义^[71]. 电力系统作为一种高维非线性的复杂系统, 故障流是内部众多数据流中极其重要的数据流向. 综合大数据和云计算的优势以及电力系统的应用需求构建大数据平台, 发挥大数据和云计算的优势, 将为智能电网的故障恢复带来新的活力.

7 结论

本文分析了含DG的配电网故障恢复模型, 对智能算法在含DG配电网故障恢复问题中的应用做了综述, 全面分析了几种目前比较流行的智能算法在含DG配电网故障恢复问题中的应用及优缺点, 并对整合不同算法后的组合智能算法在含有DG的配电网故障恢复中的优化效果进行了比较. 组合智能算法因其可以取长补短、优势互补, 实现方法寻优能力的提升, 故而更具有实用性. 针对故障恢复问题本身存在的复杂性, 并考虑到当今人们日益增长的对配电网供电稳定、安全性和经济性的要求, 多目标故障恢复优化将会成为今后的主要研究方向. 另外, 随着能源

互联网、主动配电系统、源网荷互动以及智能电网等新兴技术的飞速发展和人们对智能算法的深入研究, 越来越多的新算法和新思想将会被应用到配电网故障恢复中, 含DG配电网的故障恢复解决方案也会日趋完善, 将大大提高电网的故障恢复效率, 增强电网解决突发停电问题的能力.

参考文献(References)

- [1] 李志铿, 汪隆君, 王钢, 等. 计及故障重构的含分布式发电配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 35-40.
(Li Z K, Wang L J, Wang G, et al. Reliability evaluation for distribution system with distributed generations considering reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 35-40.)
- [2] 黄弦超. 含分布式发电的配电网故障恢复模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 52-57.
(Huang X C. Model of service restoration of distribution systems with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 52-57.)
- [3] 李志铿, 王钢, 陈志刚, 等. 基于区间潮流的含分布式发电配电网故障恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 53-58.
(Li Z K, Wang G, Chen Z G, et al. An interval load flow based algorithm for service restoration in distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 53-58.)
- [4] 冯杰, 陈骏宇, 陈明军, 等. 基于图论的含分布式发电配电网故障恢复算法[J]. 中国电力, 2015, 48(6): 63-71.
(Feng J, Chen J Y, Chen M J, et al. Research for service restoration of distribution network containing distributed generation based on graph theory[J]. Electric Power, 2015, 48(6): 63-71.)
- [5] McDermott T E, Dugan R C. PQ, reliability and DG[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2003, 9(5): 17-23.
- [6] Walling R A, Saint R, Dugan R C, et al. Summary of distributed resources impact on power delivery systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(3): 1636-1644.
- [7] Rajamani K, Hambarde U K. Islanding and load shedding schemes for captive power plants[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 805-809.
- [8] Moreira C L, Resende F O, Lopes J A P. Using low voltage microgrids for service restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 395-403.
- [9] Atwa Y M, El-Saadany E F. Reliability evaluation for distribution system with renewable distributed generation during islanded mode of operation[J]. IEEE Trans on

- Power Systems, 2009, 24(2): 572-581.
- [10] Song I K, Jung W W, Kim J Y, et al. Operation schemes of smart distribution networks with distributed energy resources for loss reduction and service restoration[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(1): 367-374.
- [11] 冯雪平, 宋晓辉, 梁英, 等. 基于最小生成树及改进遗传算法的含分布式电源配电网孤岛划分方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3470-3478.
(Feng X P, Song X H, Liang Y, et al. Islanding method based on minimum spanning tree and improved genetic algorithm for distribution system with DGs[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3470-3478.)
- [12] 曾令诚, 吕林, 曾澜钰. 基于sollin算法的含分布式电源的孤岛划分方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 95-100.
(Zeng L C, Lv L, Zeng L Y. Islanding method based on sollin algorithm for grid with distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 95-100.)
- [13] Wang X, Lin J. Island partition of the distribution system with distributed generation[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 3061-3071.
- [14] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
(Zhang H, He J H, Bo Z Q, et al. Service restoration based on dynamic programming[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.)
- [15] 汪隆君, 郭俊宏, 王钢, 等. 主动配电网孤岛划分的混合整数规划模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 136-146.
(Wang L J, Guo J H, Wang G, et al. A mixed integer programming model for islanding partition of active distribution network [J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 136-146.)
- [16] 丁磊, 潘贞存, 丛伟. 基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 62-67.
(Ding L, Pan Z C, Cong W. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proc of the CSEE, 2008, 28(25): 62-67.)
- [17] 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 C S, Li P. Development and challenges of distributed generation, the microgrid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.)
- [18] 洪海峰. 含分布式电源配电网优化重构与故障恢复重构问题研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2017.
(Hong H F. Study on optimization reconfiguration and service restoration reconfiguration for distribution network with distributed generation[D]. Hangzhou: School of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2017.)
- [19] Wu F F, Monticelli A. Analytical tools for power system restoration-conceptual design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(1): 10-16.
- [20] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
(Sun J, Wang Z P, Wang Y N, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.)
- [21] Jorge M B, Hector V O, Miguel L G, et al. Multi-fault service restoration in distribution networks considering the operating mode of distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116(11): 67-76.
- [22] 万强, 孙昊, 王乾, 等. 基于合作型协同进化遗传算法分布式发电供电恢复[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 23-26.
(Wan Q, Sun H, Wang Q, et al. Service restoration for distribution network with distributed generation based on co-evolutionary genetic algorithm[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2012, 35(3): 23-26.)
- [23] 李振坤, 刘俊, 杨帆, 等. 有源配电网的综合供电恢复及改进遗传算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 24-30.
(Li Z K, Liu J, Yang F, et al. Restoration of distribution network containing DG and a refined genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 24-30.)
- [24] 梁伟, 靳小龙, 穆云飞, 等. 含微网及电动汽车的主动配电网供电恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(6): 1-9.
(Liang W, Jin X L, Mu Y F, et al. Service restoration method to active distribution network with microgrids and electric vehicles[J]. Proc of the CSU-EPSA, 2014, 26(6): 1-9.)
- [25] Hsiao Y T, Chien C Y. Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1394-1400.
- [26] 向月, 刘俊勇, 姚良忠, 等. 故障条件下含分布式电源配电网的孤岛划分与重构优化策略研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1025-1032.
(Xiang Y, Liu J Y, Yao L Z, et al. Optimization strategy for island partitioning and reconfiguration of faulted distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1025-1032.)
- [27] 陈昕玥, 唐巍, 陈禹, 等. 基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 99-106.
(Chen X Y, Tang W, Chen Y, et al. Chance constrained

- programming based fault recovery of distribution network containing photovoltaic generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 99-106.)
- [28] 李世光, 吴晓, 高正中, 等. 基于广度优先搜索-改进蚁群算法的配电网故障恢复[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2016, 35(2): 105-112.
(Li S G, Wu Y, Gao Z Z, et al. Power service restoration of distribution network based on breadth-first search and improved ant colony algorithm[J]. J of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2016, 35(2): 105-112.)
- [29] 孙元博, 张承学, 胡志坚. 地区配电网重构与故障恢复问题[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3366-3371.
(Sun Y B, Zhang C X, Hu Z J. Reconfiguration and fault restoration of regional distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3366-3371.)
- [30] 肖惜明. 基于改进蚁群最优算法配电网故障恢复重构的研究[D]. 上海: 上海电机学院电气学院, 2016.
(Xiao X M. Based on the improved ant colony optimization algorithm research to reconstruct the distribution network fault recovery[D]. Shanghai: College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, 2016.)
- [31] 杨丽君, 常雪婷, 曹玉洁, 等. 基于多代理系统的智能配电网分散协调恢复策略[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(2): 19-29.
(Yang L J, Chang X T, Cao Y J, et al. Multi-agent system based decentralized coordinated recovery strategy for smart distribution grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(2): 19-29.)
- [32] 齐郑, 张首魁, 李志, 等. 考虑时间尺度的含DG配电网故障动态恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 31-38.
(Qi Z, Zhang S K, Li Z, et al. Dynamic service restoration strategy considering time scale for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 31-38.)
- [33] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 考虑分布式电源的配电网多类型故障恢复[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2013, 40(5): 1-7.
(Sun J, Wang Z P, Wang Y N, et al. Multiple types of service restoration algorithm for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. J of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2013, 40(5): 1-7.)
- [34] 谢夏慧, 汪泓, 卢鸣凯, 等. 大停电后初期基于分布式电源的配电网局部自我恢复方案[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1834-1840.
(Xie X H, Wang F, Lu M K, et al. A distributed generation-based local self-recovery scheme for distribution network at post-blackout early stage of power grid restoration[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1834-1840.)
- [35] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192.
(Wang Z P, Yao Y H, Guo K Y, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192.)
- [36] 杜松广. 智能配电网故障快速恢复算法的研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2014.
(Du S G. Study on fast restoration algorithm of smart distribution system[D]. Beijing: School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, 2014.)
- [37] 李世光, 吴晓, 高正中, 等. 基于改进人工蜂群算法的配电网故障恢复[J]. 中国科技论文, 2016, 11(11): 1269-1274.
(Li S G, Wu Y, Gao Z Z, et al. Distribution network service restoration based improved artificial bee colony algorithm[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(11): 1269-1274.)
- [38] 徐玉琴, 李雪冬. 基于多智能体免疫算法的多微网配电网系统供电恢复[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2010, 37(2): 15-19.
(Xu Y Q, Li X D. Application of multi-agent immune algorithm for distribution service restoration[J]. J of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2010, 37(2): 15-19.)
- [39] 杨丽君, 吕雪姣, 李丹, 等. 含分布式电源的配电网多故障抢修与恢复协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 13-19.
(Yang L J, Lv X J, Li D, et al. Coordinated optimization strategy of multi-fault repair and recovery for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electrical Power System, 2016, 40(20): 13-19.)
- [40] 王增平, 张丽, 徐玉琴, 等. 含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 8-14.
(Wang Z P, Zhang L, Xu Y Q, et al. Service restoration strategy for blackout of distribution system with distributed generators[J]. Proc of the CSEE, 2010, 30(34): 8-14.)
- [41] 刘蓓, 汪泓, 陈春, 等. 一种配电网故障阶段式恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 24-30.
(Liu B, Wang F, Chen C, et al. A phased fault restoration algorithm for distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 24-30.)
- [42] 刘斌, 雷霞, 吴泓俭. 基于膜计算的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(6): 37-41.
(Liu B, Lei X, Wu H J. Distribution network fault

- restoration based on membrane computing[J]. Proc of the CSU-EPSA, 2014, 26(6): 37-41.)
- [43] 余浩斌, 梅红兴, 程浩忠, 等. 考虑分布式电源孤岛运行的配电网故障恢复研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(11): 192-196.
(Yu H B, Mei H X, Cheng H Z, et al. Fault restoration of distribution network considering island operation of distributed power generation[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 192-196.)
- [44] 周淙, 解慧力, 郑柏林, 等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 136-142.
(Zhou Q, Xie H L, Zheng B L, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 136-142.)
- [45] 刘伟, 郑晓娜, 陈世池, 等. 含分布式电源的配电网故障重构研究[J]. 自动化仪表, 2016, 37(7): 11-15.
(Liu W, Zheng X N, Chen S C, et al. Research on the failure reconstruction of the distribution network with distributed generators[J]. Process Automation Instrumentation, 2016, 37(7): 11-15.)
- [46] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.
(Xu Y Q, Zhang L, Wang Z P, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.)
- [47] 陈汝斯, 林涛, 余光正, 等. 计及电能质量影响的智能配电网孤岛划分策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 150-158.
(Chen R S, Lin T, Yu G Z, et al. Island separation strategy of smart distribution grid considering the effects of power quality factors[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 150-158.)
- [48] 俞隽亚, 王增平, 孙洁, 等. 基于支路交换——粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 95-99.
(Yu J Y, Wang Z P, Sun J, et al. Service restoration of distribution network based on the branch exchange-particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 95-99.)
- [49] 戴志辉, 崇志强, 焦彦军. 含分布式电源的配电网多目标供电恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1959-1965.
(Dai Z H, Chong Z Q, Jiao Y J. Mul-ti-objective service restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1959-1965.)
- [50] 刘思聪, 周步祥, 宋洁, 等. 考虑分布式电源出力随机性的多目标故障恢复[J]. 电测与仪表, 2018, 55(2): 123-128.
(Liu S C, Zhou B X, Song J, et al. Multi-objective fault restoration considering the randomness of the output of distributed generator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(2): 123-128.)
- [51] 姜铨伟, 张筱慧, 丛鹏伟, 等. 含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 23-31.
(Lou C W, Zhang X H, Cong P W, et al. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 23-31.)
- [52] 姚玉海, 王增平, 郭昆亚, 等. 基于E占优的多目标二进制粒子群算法求解配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 76-81.
(Yao Y H, Wang Z P, Guo K Y, et al. Distribution network service restoration using a multi-objective binary particle swarm optimization based on E-dominance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 76-81.)
- [53] 杨丽君, 于琦, 魏玲玲, 等. 基于移动多代理动态联盟的配电网故障恢复研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 147-155.
(Yang L J, Yu Q, Wei L L, et al. A distribution network fault recovery study on the dynamic alliance of mobile multi-agent[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 147-155.)
- [54] 孟军, 汪飒, 刘蓓, 等. 分布式发电条件下配电网故障恢复现状与展望[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 46-50.
(Meng J, Wang F, Liu B, et al. Review and prospect of service restoration algorithm of distribution networks with distributed generation[J]. Proc of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 46-50.)
- [55] 牛耕, 孔力, 周龙, 等. 含分布式电源的配电网的供电恢复技术研究综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 51-62.
(Niu G, Kong L, Zhou L, et al. Review of power service restoration of distribution network with distributed generation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 51-62.)
- [56] 张旭, 程雪婷, 赵冬梅, 等. 电网故障恢复的发展、现状及展望[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 13-19.
(Zhang X, Cheng X T, Zhao D M, et al. Development, status and prospect of fault restoration in power grid[J]. Proc of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 13-19.)
- [57] 孙秋野, 滕菲, 张化光. 能源互联网及其关键控制问题[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 176-194.
(Sun Q Y, Teng F, Zhang H G. Energy internet and its key control issues[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(2): 176-194.)
- [58] 叶小忱, 王承民, 孙伟卿, 等. 面向能源互联网的主动

- 配电网技术[J]. 自动化仪表, 2017, 38(1): 7-11.
(Ye X C, Wang C M, Sun W Q, et al. Technologies of active distribution network orienting to energy internet[J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(1): 7-11.)
- [59] 孙秋野, 杨凌霄, 张化光. 智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 938-949.
(Sun Q Y, Yang L X, Zhang H G. Smart energy—Application and prospects of artificial intelligence technology in power system[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 938-949.)
- [60] 杨婷, 赵晋泉, 韩佳兵, 等. 计及主网潮流响应的主动配电网故障恢复研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(5): 51-56.
(Yang T, Zhao J Q, Han J B, et al. Study on service restoration for active distribution network considering power flow of main network[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 51-56.)
- [61] 洪小雨. 主动配电网故障恢复重构研究[D]. 北京: 北京交通大学电气工程学院, 2014.
(Hong X Y. Service restoration of active distribution network[D]. Beijing: School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, 2014.)
- [62] 杨丽君, 曹玉洁, 梁景志, 等. 基于博弈思想的需求响应视角下的主动配电网故障恢复[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(7): 51-60.
(Yang L J, Cao Y J, Liang J Z, et al. Active distribution network fault restoration based on game theory in demand response perspective[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(7): 51-60.)
- [63] Oboudi M H, Hooshmand R, Karamad A. Feasible method for making controlled intentional islanding of microgrids based on the modified shuffled frog leap algorithm[J]. Int J of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 745-754.
- [64] 张磐, 唐萍, 丁一, 等. 考虑分布式发电波动性的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 115-120.
(Zhang P, Tang P, Ding Y, et al. Service restoration strategy considering the volatility of distribution generations for active distribution network[J]. Proc of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 115-120.)
- [65] Chen C, Wang J, Qiu F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [66] 李承熹, 杨强, 颜文俊. 含分布式光伏电源的微电网孤岛动态运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 99-105.
(Li C X, Yang Q, Yan W J. Dynamic islanding operation of microgrid with distributed photovoltaic generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 99-105.)
- [67] Pilar Meneses de Quevedo, Javad Allahdadian, Javier Contreras, et al. Islanding in distribution systems considering wind power and storage[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2016, 5: 156-166.
- [68] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.
(Yao J G, Yang S C, Wang K, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.)
- [69] 于雷, 陈奇芳, 段力铭, 等. 配电网故障情况下多微网互联能力分析[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 682-689.
(Yu L, Chen Q F, Duan L M, et al. Analysis on interconnectivity of multi-microgrids under fault condition of distribution network[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 682-689.)
- [70] 茆美琴, 丁勇, 王杨洋, 等. 微网——未来能源互联网系统中的“有机细胞”[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 1-11.
(Mao M Q, Ding Y, Wang Y Y, et al. Microgrid—An “organic cell” for future energy interconnection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 1-11.)
- [71] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
(Peng X S, Deng D Y, Cheng S J, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J]. Proc of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.)
- [72] 杨珺, 吴飞业. 基于双鱼群算法的电力系统无功优化[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1886-1892.
(Yang J, Wu F Y. Reactive power optimization of power system based on double fish swarm algorithm[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1886-1892.)

作者简介

杨珺(1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事新能源发电及并网优化、主动配电系统协同控制等研究, E-mail: yangjun@mail.neu.edu.cn;

孔文康(1992—), 男, 硕士, 从事配电网故障恢复的研究, E-mail: 810957308@qq.com;

孙秋野(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事能源互联网的建模与优化运行等研究, E-mail: sunqiuye@mail.neu.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)