

基于融合熵时段划分的三相配电网动态重构

童方格¹, 谭阳红¹, 罗春辉²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省送变电工程有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:针对大规模电动汽车接入配电网带来的三相不平衡程度加剧问题,提出一种基于融合熵时段划分的三相配电网动态重构方法。在Fisher-最优分割的基础上,融合曲线的信息熵,对蒙特卡洛模拟得到的等效日负荷曲线进行更加精准合理的时段划分;将动态重构策略引入三相配电网中,以三相不平衡度最低为目标建立配电网重构模型;改进传统的帝国主义竞争算法,在殖民地革命环节中引入复合型微分进化思想,并提出自适应帝国合并机制以提高算法的收敛速度和精度。IEEE 33节点系统仿真结果表明,所提方法能对曲线进行合理的分段重构,并且有效解决了配电网中的三相不平衡问题。

关键词:配电网;电动汽车;三相不平衡;动态重构;信息熵;Fisher-最优分割;帝国主义竞争算法

中图分类号:TM 732;U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201910018

0 引言

近年来,伴随着我国社会水平的发展进步,配电系统中负荷种类与规模大幅增加,配电系统的有效覆盖面积已经达到有效供电的95%以上。同时电动汽车(EV)作为一种新兴负荷,以其污染小、可替代率高、噪音低的优点,被各国政府、汽车行业、汽车用户所接受。但是电动汽车大规模随机性的接入与常规负荷的增长将带来一系列新的问题,例如三相配电网的网损剧烈增加、三相不平衡度严重上升、节点电压波动较大等安全隐患,给我国配电网带来了二次冲击与考验。配电网动态重构作为优化电力系统运行的手段之一,需要调整改进以适应时代的发展。

目前配电网动态重构^[1]有2种求解方案:第一种直接在每个单位时间段内进行静态重构,通过比较开关的动作方案或者设定相应的阈值等标准,合并选定时段^[2-3];第二种方案则是先模拟产生一天内的负荷曲线变化,然后对曲线进行时段划分,目前大部分文献均在该方案的基础上进行研究与改进。文献[4]将光伏输出功率曲线与负荷曲线进行叠加,形成日等效负荷曲线,然后在文献[5]的基础上,改进单调性分段的方法,并采用整数型量子群进行编码求解;文献[6]首次提出分布式电源(DG)和入网电动汽车充放电功率叠加成日负荷曲线,研究风电机组和不同类型电动汽车对电网经济性的影响;文献[7]以区间数描述最小化网损为目标函数,提出依据动态降损参数的动态时段划分;文献[8]在得到负荷曲线的基础上,采用最优模糊C均值聚类法对负荷数

据进行聚类分割和动态重构;文献[9]根据信息熵最小对等效负荷曲线进行时段最优划分,但是缺少对曲线最基本的趋势分段,只是单纯地保留信息的最大化。以上文献均只在单相配电网中进行动态重构,未将动态重构应用到实际三相配电网系统中。针对目前研究现状,需进行2点改进:①在电动汽车繁荣发展和信息数据时代背景下,需要引进一种更加符合实际应用的分段方法;②将动态重构应用到实际三相配电网系统中,解决三相配电网存在的三相不平衡问题。

针对以上问题,本文首先通过蒙特卡洛模拟得到电动汽车充电曲线,与日负荷曲线叠加形成等效日负荷曲线,并在Fisher-最优分割的基础上,提出一种融合信息熵理论划分时间段落的新方法,保证时间段落划分的合理性与严谨性;其次,选取三相不平衡度最低为优化目标,在三相配电网中建立对应的动态重构模型;然后,在传统帝国主义竞争算法ICA(Imperialist Competitive Algorithm)的殖民地革命环节中引入复合型微分进化思想,同时提出自适应帝国合并机制;最后,通过IEEE 33节点三相系统算例仿真,验证了所提动态重构方法的合理性。

1 基于融合熵的等效负荷曲线最优分段

1.1 基于蒙特卡洛模拟法得到的等效日负荷曲线

考虑到本文是单独针对大规模电动汽车提出三相动态重构策略,负荷曲线含分布式电源的叠加意义不大,根据文献[10]所描述的数据,使用蒙特卡洛模拟法对常规负荷与给定数量电动汽车进行负荷曲线模拟,并将两者叠加。限于篇幅,本文未对电动汽车充电建模加以说明。

1.2 关于融合熵时段划分的基本原理与定义

1.2.1 Fisher-最优分割法的基本原理

Fisher-最优分割法是有序样本聚类分析的有效

收稿日期:2018-11-27;修回日期:2019-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102039,51577046)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61102039,51577046)

方法之一,以总段落内部的总离差平方和最小为目标,使分得的段落内部差异最小,而各段落间差异最大^[11]。

用 $T(n, k)$ 表示将 n 个有序样本 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 分为 k 段,这种分段可以表示为:

$$\begin{cases} u_1 = \{x_1, x_1 + 1, \dots, x_2 - 1\} \\ u_2 = \{x_2, x_2 + 1, \dots, x_3 - 1\} \\ \vdots \\ u_k = \{x_k, x_k + 1, \dots, n\} \end{cases} \quad (1)$$

其中,分段点为 $1 = x_1 < x_2 < \dots < x_k < n = 24$ 。

1.2.2 段直径的定义

设某一段落 U 包含 $j-i+1$ 个样本 $\{a_i, a_{i+1}, \dots, a_j\}$ ($j > i$), 记为 $U = \{i, i+1, \dots, j\}$ 。该段落 U 的均值为:

$$\bar{a}_u = \frac{1}{j-i+1} \sum_{t=i}^j a_t \quad (2)$$

用 $Z(i, j)$ 表示该段落 U 的直径, 记为:

$$Z(i, j) = \sum_{t=i}^j (a_t - \bar{a}_u)^2 \quad (3)$$

1.2.3 关于信息熵的定义与分段原则

熵原本用在热力学领域, 1948 年, Shannon 提出信息熵的概念, 解决信息量化度量的问题, 并利用信息熵描述信息的不确定性^[12]。

曲线 k 分段下各时段等效负荷概率及对应时段下的信息熵计算式如下:

$$p_k(e_j) = e_j \Delta t_j / \left(\sum_{j=1}^k e_j \Delta t_j \right) \quad (4)$$

$$H(n, k) = - \sum_{j=1}^k p_k(e_j) \log_2 p_k(e_j) \quad (5)$$

其中, e_j 为第 j 个时段的等效负荷, 为第 j 个时段内单位时段负荷的平均值; $p_k(e_j)$ 为第 j 个时段等效负荷概率; Δt_j 为第 j 个时段的持续小时数; $H(n, k)$ 为曲线 k 分段下的信息熵。

基于信息熵的分段原则如下。

(1) 由式(4)可知, 最完全分段 ($k=24$) 时对应最大的信息熵 H_{24} 。随着时段划分增多, 时段数增加, 信息熵增大 (简称熵增), 包含的信息量也增加。

(2) 式(5)中的 p_k 在 $[0, 1]$ 范围内, 求得 $H(n, k)$ 函数的二阶导数恒小于等于 0, 可知信息熵函数为凸函数。

1.2.4 融合熵曲线分段的目标函数

传统 Fisher-最优分割中 $T(n, k)$ 越小, 表示段落内部变化越小, 而分段之间的差距越大, 分割越合理。

$$T(n, k) = \sum_{i=1}^k Z(x_i, x_{i+1} - 1) \quad (6)$$

形成融合熵曲线分段的意义为:

(1) 由于开关寿命与操作费用的限制, 重构次数应该尽量少, 即曲线分段数尽量保证最优分割;

(2) 在最优分割的基础上尽可能使得分段后数据包含的信息量最大化。

根据信息熵函数 $H(n, k)$ 随 k 的增加呈现递增的凸函数性质, 且最终保持收敛。定义融合熵曲线分段的目标函数为:

$$Q(n, k) = 1/H(n, k) \quad (7)$$

$$G(n, k) = \min \left(\frac{T(n, k)}{T_{\max}} + \frac{Q(n, k)}{Q_{\max}} \right) \quad k \in [2, 24] \quad (8)$$

其中, 下标“max”表示相应变量最大值。式(8)为归一化后的函数式。根据 Q_k 的含义, 计算得到 $Q_{\max}$ 在 $k=1$ (没有进行分段) 时趋近于无穷大, 因此取 $Q_{\max} = Q(n, 2)$ 、 $T_{\max} = T(n, 2)$, 并从 $k=2$ 开始计算式(8)所示目标函数值。

1.3 融合熵曲线分段的基本步骤

1.3.1 最优解的求法

$G(n, k)$ 为将 n 个有序样本进行最优 k 分段, 有如下定理: 对有序样本 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 进行最优 k 分段一定是在其某个截尾子段的最优 $k-1$ 分段 $G(n, k-1)$ 后再叠加一段形成的^[13]。

当已知分段数 k ($k \in [2, 24]$) 时, 求使 $G(n, k)$ 最小的分段点, 其求解步骤如下。

确定使 $G(n, k)$ 值达到最小的最初分段点 x_k , 如式(9)所示。

$$G(n, k) = G(x_k - 1, k - 1) + U(x_k, n) \quad (9)$$

其中, $U(x_k, n) = Q^*(x_k, n) + Z^*(x_k, n)$, $Q^*(x_k, n)$ 与 $Z^*(x_k, n)$ 为样本段 u_k 归一化后的函数值。

于是得到第 k 段为 $u_k = \{x_k, x_k + 1, \dots, n\}$, 然后寻找 x_{k-1} , 使其满足式(10), 得到第 $k-1$ 段 $u_{k-1} = \{x_{k-1}, x_{k-1} + 1, \dots, x_k - 1\}$ 。依此类推, 可以得到所有分段 $\{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, 为最优 k 分割下的分段结果。

$$G(x_k - 1, k - 1) = G(x_{k-1} - 1, k - 2) + U(x_{k-1}, x_k - 1) \quad (10)$$

1.3.2 最优分段数目的确定

选定 $k \in [2, 24]$, 根据最优解求解步骤在 MATLAB 中绘制目标函数 $G(n, k)$ 随分段数 k 变化而变化的融合熵曲线, 考虑重构中分段不宜过大, 故取曲线的拐点对应的 k 值为最优分段数, 并计算该曲线在各分段点的斜率的值:

$$g(k) = \left| \frac{G(n, k) - G(n, k-1)}{k - (k-1)} \right| \quad (11)$$

根据得到的 $G(n, k) - k$ 曲线, $g(k)$ 越大, 表明 k 分段比 $k-1$ 分段更合适, $g(k)$ 接近于某一稳点值时则不必继续划分, 当 $g(k)$ 取得最大值 (即拐点处), 此时对应的分段数 k 即为本文所提方法的最优分段数。

2 配电网重构的三相数学模型

2.1 三相重构模型的目标函数

定义三相不平衡度^[14]如下:

$$\begin{aligned} |D_{\varphi}^t| &= I_{tr,\varphi}^t / I_{av}^t - 1 \\ I_{av}^t &= (I_{tr,a}^t + I_{tr,b}^t + I_{tr,c}^t) / 3 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, D_{φ}^t 为配电变压器 φ ($\varphi=a, b, c$) 相在 t 时段内的电流不平衡度; $I_{tr,\varphi}^t$ 为变压器出口侧三相电流幅值; I_{av}^t 为变压器出口侧在 t 时段内的三相电流幅值的平均值。

选取三相配电网总的三相不平衡度最低为目标函数, 如式(13)所示。

$$\min D_u = \sum_{i=1}^k \max(|D_a^t|, |D_b^t|, |D_c^t|) \quad (13)$$

其中, D_u 为三相电流总体不平衡度。

2.2 三相重构模型的约束条件

(1) 网络拓扑约束: 重构后的配电网必须完全辐射状运行, 避免环网及电力孤点等特殊情况。

$$G_k \in G \quad (14)$$

其中, G 为辐射状网络结构的集合; G_k 为每次重构动作后的配电网结构。

(2) 配电网三相潮流约束: 配电网重构满足三相潮流方程。

(3) 节点电压与支路电流以及中性线电流约束:

$$\begin{cases} U_{jmin} \leq U_{j,\varphi} \leq U_{jmax} \\ I_{imin} \leq I_{i,\varphi} \leq I_{imax} \\ I_{chmin} \leq I_{i,n} = I_{i,a} + I_{i,b} + I_{i,c} \leq I_{chmax} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\varphi=a, b, c$; U_{jmin} 、 U_{jmax} 分别为第 j 个负荷节点容许的最小电压和最大电压; $U_{j,\varphi}$ 为第 j 个负荷节点 φ 相的实际电压; I_{imin} 、 I_{imax} 分别为第 i 条支路容许的最小电流和最大电流; $I_{i,\varphi}$ 为第 i 条支路 φ 相的电流; $I_{i,n}$ 为第 i 条支路中性线上的电流; I_{chmin} 、 I_{chmax} 分别为中性线上承载电流最小、最大值。

(4) 支路容量约束:

$$S_{i,\varphi} \leq S_{imax} \quad (16)$$

其中, $S_{i,\varphi}$ 为第 i 条支路 φ 相的实际负荷; S_{imax} 为第 i 条支路容许的最大容量。

(5) 开关操作数约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k |Q_{j,i} - Q_{j,i-1}| \leq Q_{jmax} \\ \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^k |Q_{j,i} - Q_{j,i-1}| \leq Q_{max} \end{cases} \quad (17)$$

其中, N_s 为可动作开关总数; $Q_{j,i}$ 为开关 j 在 i 时段的开闭状态; Q_{jmax} 为开关 j 的最大动作次数; Q_{max} 为总开关动作次数。

3 改进帝国主义竞争算法

3.1 传统ICA

ICA 是由 Atashpaz-Gargari 和 Lucas 受帝国主义殖民竞争机制启发于 2007 年提出的一种进化算法^[15]。该算法当前已经在潮流计算、系统调度、无功

优化、电网碳排放等问题上体现出优势性能, 现引进该算法用于配电网重构, 并对其作出改进。

传统 ICA 步骤包括帝国的产生、同化(革命、交换)、合并、竞争及灭亡。

(1) 帝国产生: 所有国家均用一个 K 维向量表示, 本文中 K 为动作的联络开关数。先随机选取 N_{total} 个初始国家, 根据目标函数最小分配前 N_{imp} 个最初帝国主义国家和余下的 $N_{total} - N_{imp}$ 个国家殖民地。

(2) 帝国同化: 帝国主义国家的殖民地向所属国家模拟移动靠近的过程。此时判断新位置的殖民地势力是否强于当前所属帝国, 若是, 则交换双方位置。

(3) 帝国合并: 当 2 个帝国之间距离较近时, 较弱帝国淘汰为新帝国的殖民地。

(4) 帝国竞争: 帝国之间通过争夺较弱帝国的较弱殖民地实现扩张强大, 势力越大(目标函数越优)的帝国越有可能得到较弱殖民地。

(5) 帝国灭亡: 各帝国中势力较弱的殖民地不断被其他帝国吞并占据。算法结束时只剩唯一位置下的一个帝国, 即全局最优解。

3.2 改进帝国主义竞争算法

(1) 复合型微分进化的殖民地革命。

在帝国同化的过程中, 传统算法的殖民地更新是将帝国内势力较弱的殖民地以同等数量的随机较强殖民地代替, 尽管该步骤有效改善了算法种群的多样性, 但是无约束地增加了求解深度和时间, 而且可能使得势力较大的殖民地丢失概率变大, 削弱了算法在搜索宽度上的能力, 从而影响最终的寻优结果。针对上述问题引入复合型微分进化思想, 根据迭代次数的变化选择合适的变异基向量, 保证殖民地多样性的同时, 增加寻优精度与速度。

帝国内殖民地根据式(18)进行复合型微分进化思想的革命更新。

$$C = \begin{cases} C_{ola3} + F(C_{ola1} - C_{ola2}) & 0 < g \leq N/2 \\ i_{mpbest} + F(C_{ola1} - C_{ola2}) & N/2 < g \leq N \end{cases} \quad (18)$$

其中, F 为变异尺度因子, 用于调整殖民地之间差值的放大幅度; $C_{ola1} - C_{ola3}$ 为所有殖民地中的 3 个随机个体; g 为当前迭代次数; N 为设置的 ICA 的最大迭代次数; i_{mpbest} 为当前迭代中的最适应帝国主义国家。

复合型微分进化思想中的交叉策略生成新解以及贪婪策略判断是否交换新旧殖民地本文不展开论述。

(2) 自适应的帝国合并机制。

帝国合并机制中的合并规则虽然加快了算法的收敛速度, 但是不能保证种群的多样性, 而且容易陷入局部最优解。因此, 本文在合并机制中引入自适应概率 p_m , 在算法初期以较小概率进行合并判断, 保

证种群的多样性,在算法后期以一个可容性概率加以限制,保证算法的收敛速度。

$$p_m = p_1 e^{\frac{g}{N}} \quad (19)$$

其中, p_1 为判断帝国合并的概率。

在满足距离阈值的要求下,改进的合并机制在每一轮迭代中产生相应的随机数,若小于自适应概率则满足合并要求,否则,放弃合并。

3.3 改进帝国主义竞争算法的重构流程图

针对配电网动态重构求解模型,本文提出的改进帝国主义竞争算法 IICA (Improved Imperialist Competitive Algorithm) 求解流程如图 1 所示。

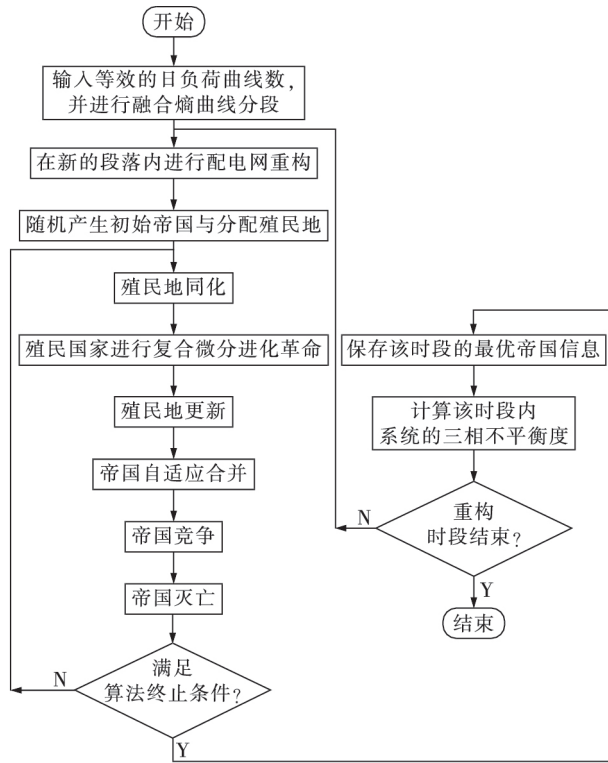


图 1 IICA 的重构流程图

Fig.1 Flowchart of reconstruction with IICA

4 算例分析

4.1 算例参数

本文采用改进的 IEEE 33 节点时变系统作为基本算例,实现等效负荷曲线时间尺度下的三相配电网动态重构。系统基本参数见文献[16],3类负荷时间分布,组成比例见文献[3]。系统结构拓扑如图 2 所示。重构过程的参数设置如下。

(1)配电网中接入的电动汽车参数设置。考虑电动汽车的集中与分散充电模式,集中充电站建立在节点 14、7、27 上,其余节点为随机接入。设置该配电系统总共为 1000 辆电动汽车提供服务,单台汽车电池容量为 24 kW·h,平均能耗为 0.12 kW·h/km,

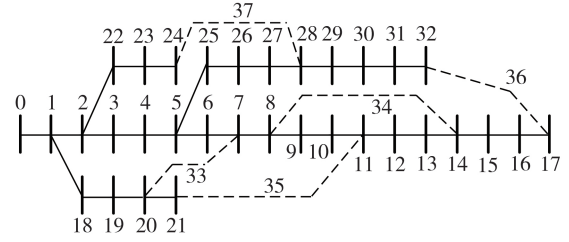


图 2 IEEE 33 节点系统拓扑结构图

Fig.2 Structural topology diagram of IEEE 33-bus system

充放电功率范围为 [3.5, 4.5] kW, 充电效率为 95%。其余日行驶里程与出行返回参数服从正态分布,见文献[10]。假定汽车行驶过程均为平均时速,返回后立即以最大充电功率充电,且每次充电充至满电。

(2)IICA 的参数设置。IICA 中初始国家数量为 $N_{\text{total}}=100$, 帝国与殖民地数量分别为 $N_{\text{imp}}=10$ 、 $N_{\text{col}}=90$, 帝国合并概率 $p_1=0.5$ 。复合型微分算子 $F=0.3$, 交叉概率 $C_r=0.75$, 最大迭代次数 $N=100$ 。

(3)动态重构的开关约束设置。单个开关最大动作次数为 3, 所有开关最大总动作次数为 18。

4.2 仿真结果与分析

本文提出了一种融合熵的最优曲线分割方法,对上述所引入算例形成等效日负荷曲线,并根据 1.3 节中步骤对曲线进行分段处理,得到归一化后的 $G(n, k)-k$ 关系曲线和对应负荷曲线的分段结果分别如图 3 和图 4 所示。

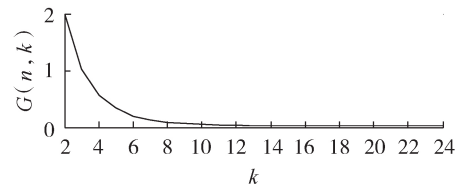


图 3 归一化后的 $G(n, k)-k$ 曲线图

Fig.3 Curve of $G(n, k)$ vs. k after normalization

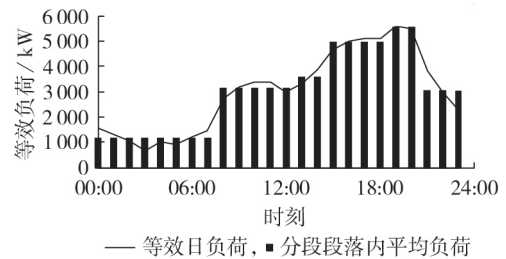


图 4 基于融合熵分段的等效日负荷曲线

Fig.4 Equivalent daily load curve based on fusion entropy section

由图 3 可见,随着 k 的增加,曲线先快速下降,后趋于平缓,从图中易知 $k=6$ 为曲线的拐点,也是基于分段的平衡点。由于信息熵的冗余性,曲线最终并未趋近于 0。根据 1.3.2 节中的方法和已知最优分段

数($k=6$),求得最优分割时间点以及分段段落内的等效负荷见图4。

针对本文所提融合信息熵的方法,在同一电动汽车集中充电模式下进行不同分段方案的动态重构结果比较:方案1为单独考虑最优分割下的配电网动态重构,实行段落内部差异小、段落间差异大的严格分段,保证负荷变化下的稳定性;方案2为文献[9]中基于信息熵的仅考虑信息最大化趋势下的动态重构;方案3为本文所提基于融合熵的动态重构,决策方案如表1所示。

表1 集中充电方式下的动态重构结果
Table 1 Dynamic reconstruction results under centralized charging mode

方案	时刻	断开支路号	重构次数	三相不平衡度	对应平衡下的网损/kW
重构前		33,34,35,36,37	0	2.140 3	1 647.200
1	00:00	7,34,35,14,27	6	0.041 3	189.458
	03:00	7,34,35,12,27			
	08:00	7,34,35,8,27			
	14:00	7,34,8,12,27			
	19:00	7,34,8,12,27			
	21:00	7,34,8,14,27			
	23:00	7,34,35,9,27			
2	00:00	7,34,35,8,27	4	0.052 7	264.765
	07:00	7,34,35,14,26			
	12:00	7,34,35,14,26			
	15:00	7,34,35,9,26			
3	21:00	7,34,35,12,27	3	0.043 6	194.076
	00:00	7,34,35,9,27			
	08:00	7,34,35,9,27			
	13:00	7,34,35,8,27			
	15:00	7,34,35,8,27			
	19:00	7,34,35,8,27			
	21:00	7,34,35,8,4			

由表1结果可见,针对未进行动态重构分段和三相平衡优化的配电网,方案3能有效降低三相不平衡度,下降率为97.96%,同时,随着三相不平衡度的降低,对应网损也随之降低为194.076 kW,比原始网损减少了88.22%,证明了所提方法的有效性。

尽管方案3分段数大于方案2分段数,但是其对配电网中三相不平衡程度降低更多,显然方案3比方案2更为有效,且方案3的重构次数和总动作开关数均比方案2少;对于方案1的最优分割,虽然其分段数较为严格,但其重构次数为6,总开关操作次数为18,远大于方案3中的重构次数3以及总开关操作次数10,并且已达到开关操作次数约束的最大临界值,此时需要考虑到配电网的安全性问题,一天周期中过多的分段开关操作将增加设备的故障发生概率,严重将造成配电网不稳定运行;另外从经济性角度分析方案1、3,方案1中下降的三相不平衡度及对应网损分别为重构前的98.07%与88.50%,与方案3

的结果97.96%与88.22%相比,差值分别为0.11%与0.28%(达到千分级位差水平),2种方案的优化结果差别不大,但是考虑到重构开关操作以及设备维修等费用,方案3有明显优势。综合考虑系统运行的经济性以及安全性,优先选择本文所提方案3的动态重构策略。

根据电动汽车集中与分散充电模式,定义3种不同的电动汽车接入场景,分别为:场景1,电动汽车初始阶段,该阶段所有电动汽车仅接入集中充电站节点14、7、27,为轻微不平衡状态;场景2,电动汽车发展阶段,该阶段一部分电动汽车接入集中充电站,其他电动汽车随机接入其余节点,设置比例为0.5:0.5,为中度不平衡状态;场景3,电动汽车稳定阶段,该阶段为电动汽车可随机接入任意节点的稳定阶段,为严重不平衡状态。

表2为不同平衡场景下的动态重构结果(表中平均最低节点电压为标么值)。由表中可知,场景1—3的三相平衡度分别下降97.96%、81.85%、76.71%,而网损分别下降88.22%、84.62%、85.49%。依次比较场景1—3的结果发现,配电网重构在初期解决三相不平衡问题的效果更为显著,随着配电网三相不平衡程度的上升,动态重构对场景3中严重的三相不平衡的降低程度不如场景1、2,但是还是能大面积缓解,同时体现了重构在减少网损方面的优势。分析表2是因为配电网重构只能改变网络的拓扑结构,对于从根本上解决三相不平衡问题有一定的限制。上述证明了本文所提方法能有效降低系统的三相不平衡度和网损,体现了其在实际运用中的优势,尤其是解决未来电动汽车以及多种负荷迅速发展下的严重三相不平衡问题。

表2 不同平衡场景下的动态重构结果
Table 2 Dynamic reconstruction results under different equilibrium scenarios

场景	初始三相不平衡度	初始网损/kW	三相不平衡度	对应平衡下的网损/kW	平均最低节点电压
1	2.140 3	1 647.20	0.043 6	194.076 0	0.982 2
2	2.486 2	1 441.81	0.451 2	221.764 3	0.978 3
3	3.402 6	1 700.30	0.792 5	246.572 5	0.971 2

将本文所提IICA与传统ICA进行比较,求解场景1中第四峰值段落中三相不平衡度对应的网损,如图5所示。

由图5知,传统ICA迭代9次才收敛,而且容易陷入局部收敛,而IICA总共经历2次网损变化,在第三次迭代就能得到全局最优解。比较二者在100次运行下段内重构的平均收敛时间,传统ICA为6.1 s, IICA仅为3.5 s,缩短了将近一半的时间。可见,本文提出的IICA能够避免早熟,迅速得到最低的有功网

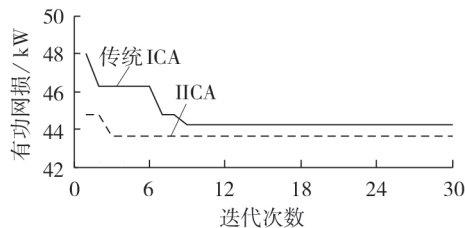


图5 传统ICA与IICA收敛曲线

Fig.5 Convergence curves of traditional ICA and IICA

损值,并且能有效缩短求解时间,保证在重构问题上的求解效率。

5 结论

本文首先提出了一种融合熵时段划分的配电网动态重构方法,然后将动态重构策略引入三相配电网中解决电动汽车等负荷带来的日益严峻的三相不平衡问题,仿真结果证明本文所提方法具有实际的工程应用价值。本文所做工作如下。

(1)提出一种新的时段划分方法。在Fisher-最优分割的基础上,考虑信息熵的融合,保证了最优分割下的信息最大化,并且避免了提前分段和给定阈值的人为因素,体现了时段划分的合理性与严谨性。

(2)将配电网动态重构引入实际的三相配电网中,用于求解三相配电网中存在的三相不平衡问题。通过3种不同平衡场景的动态重构,验证了本文所提方案能够有效解决三相不平衡问题,并能降低网损,保证系统的优化运行。

(3)在算法的殖民地革命环节引入复合型微分进化思想,并提出自适应帝国合并机制,解决了ICA的不稳定和早熟问题,加快最优解的生成速度并保证解的质量,体现了IICA在求解配电网重构问题上的优势。

参考文献:

- [1] 陈浩河. 配电网网络重构方法综述[J]. 中国高新技术企业, 2013(29):124-125.
CHEN Haohe. Overview of network reconstruction methods for distribution networks[J]. China High-Tech Enterprises, 2013(29):124-125.
- [2] 孙惠娟,彭春华,袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备, 2014,34(9):41-46.
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YUAN Yisheng. Multi-objective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(9):41-46.
- [3] 王伟,谭阳红. 量子粒子群算法在配电网多时段动态重构中的应用[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 31-38.
WABG Wei, TAN Yanghong. The application of quantum particle swarm optimization algorithm in multi-period dynamic reconfiguration of distribution network[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(6):

31-38.

- [4] 陈禹,唐巍,陈昕玥,等. 基于负荷-光伏等效负荷曲线动态分段的配电线路联络开关优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3):47-53.
CHEN Yu, TANG Wei, CHEN Xinyue, et al. Tie switch allocation optimization based on dynamic segment of equivalent load-PV curve [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(3):47-53.
- [5] 文娟,谭阳红,雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重[J]. 电力系统保护与控制, 2015,43(16):73-78.
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015,43(16): 73-78.
- [6] 陈光,戴攀,周浩,等. 计及入网电动汽车和分布式电源的配电系统重构[J]. 电网技术, 2013,37(1):82-88.
CHEN Guang, DAI Pan, ZHOU Hao, et al. Distribution system reconfiguration considering distributed generators and plug-in electric vehicles[J]. Power System Technology, 2013, 37(1):82-88.
- [7] 李扬,韦钢,马钰,等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. 电力系统自动化, 2018,42(5):102-110.
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Distribution reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distribution generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,42(5):102-110.
- [8] 王淳,高元海. 采用最优模糊C均值聚类和改进化学反应算法的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(10): 1682-1691.
WANG Chun, GAO Yuanhai. Dynamic reconfiguration of distribution network based on optimal fuzzy C-means clustering and improved chemical reaction optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(10):1682-1691.
- [9] 赵静翔,牛焕娜,王钰竹. 基于信息熵时段划分的主动配电网动态重构[J]. 电网技术, 2017,41(2):402-408.
ZHAO Jingxiang, NIU Huanna, WANG Yuzhu. Dynamic reconfiguration of active distribution network based on information entropy of time intervals[J]. Power System Technology, 2017, 41(2):402-408.
- [10] 杜习超,刘永民,徐则诚,等. 电动汽车随机负荷建模及对配电网节点电压分布的影响[J]. 电力自动化设备, 2018,38(6): 124-130.
DU Xichao, LIU Yongmin, XU Zecheng, et al. Modeling of random load of electric vehicle and its influence on node voltage distribution of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,38(6):124-130.
- [11] 王双银,杨筱筱. 基于相关系数和Fisher最优分割法的汛期分期研究[J]. 水文, 2011,31(4):1-5.
WANG Shuangyin, YANG Xiaoxiao. Flood season division based on correlation coefficient and optimum partition method of Fisher[J]. Journal of China Hydrology, 2011,31(4):1-5.
- [12] SHANNON C. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948,27(1-2):623-656.
- [13] 莫崇勋,王大洋,朱新荣,等. Fisher最优分割法在澄碧河水库汛期分期中的应用[J]. 水力发电, 2017,43(6):19-22,27.
MO Chongxun, WANG Dayang, ZHU Xinrong, et al. Application of Fisher optimal partition on flood season staging in Chengbihe reservoir[J]. Water Power, 2017,43(6):19-22,27.
- [14] 孙惠娟,彭春华,余廷芳. 配电网三相平衡优化重构策略[J]. 电网技术, 2014,38(3):789-794.

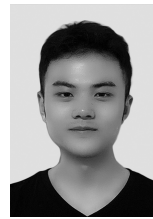
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YU Tingfang. A three-phase equilibrium reconfiguration strategy for distribution network [J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 789-794.

[15] ATASHPAZ-GARGARI E, LUCAS C. Imperialist competitive algorithm; an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. [S.l.]: IEEE, 2007: 4661-4667.

[16] 车仁飞. 配电网潮流计算及重构算法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2003.

CHE Renfei. Studies on power flow and network reconfiguration for distribution systems [D]. Jinan: Shandong University, 2003.

作者简介:



童方格

童方格(1995—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车入网、配电网优化运行与控制(**E-mail**: 462406371@qq.com);

谭阳红(1971—),女,湖南娄底人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为配电网故障诊断、智能与实时信息处理(**E-mail**: tanyho@126.com);

罗春辉(1991—),男,湖北荆州人,硕士生,主要研究方向为电力系统综合节能、电动汽车入网、智能配电系统风险分析与运行优化(**E-mail**: chluo@hnu.edu)。

Dynamic reconstruction of three-phase distribution network based on time division of fusion entropy

TONG Fangge¹, TAN Yanghong¹, LUO Chunhui²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Electric Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: Aiming at the aggravation of three-phase unbalance degree caused by the access of large-scale electric vehicles into distribution network, a dynamic reconstruction method of three-phase distribution network is proposed based on time division of fusion entropy. On the basis of Fisher-optimal segmentation, the information entropy of curve is fused to make more accurate and reasonable time division of equivalent daily load curve obtained by Monte Carlo simulation. The dynamic reconstruction strategy is introduced into three-phase distribution network, and a distribution network reconstruction model is established with lowest three-phase unbalance degree as its object. The traditional imperialist competitive algorithm is improved, the hybrid differential evolution idea is introduced into the link of colony revolution, and a self-adaptive imperialist combination mechanism is proposed to improve the convergence speed and precision of the algorithm. The simulative results of IEEE 33-bus system show that the proposed method can reconstruct the curve in reasonable segments, and effectively solves three-phase unbalance problem of distribution network.

Key words: distribution network; electric vehicles; three-phase unbalance; dynamic reconstruction; information entropy; Fisher-optimal segmentation; imperialist competition algorithm