考虑负荷分布变化的改进组合电力系统 等效负荷持续曲线法

谈天夫」,高山1.李海峰2.罗建裕2

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 江苏省电力公司,江苏 南京 210014)

摘要,针对组合电力系统等效负荷持续曲线法中忽视负荷水平变化的影响而导致的可靠性评价偏差,采用 基于负荷比例分布的聚类方法对负荷水平的变化进行描述、依据聚类中心集并借助于灵敏度方法进行负 荷点最大可达功率值计算,采用相关因子概念反映节点负荷水平与负荷比例分布之间的关联,形成改进的 组合电力系统等效负荷持续曲线法。MRBTS 系统和 IEEE-RTS 79 系统算例结果表明,改进后的算法在可靠 性指标评价的准确性方面有所提高,在系统各负荷相关度较低的情况下效果明显。

关键词: 电力系统: 负荷; 随机生产模拟; 最大可达功率; 聚类方法; 相关因子; 灵敏度分析

中图分类号: TM 715 文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.008

引言 0

电力网络对供电可靠性具有重要影响,网络传 输能力的限制、网架的薄弱以及线路的随机故障都 可能带来可靠性损失,所以在可靠性相关的评价中, 网络是值得考虑的重要因素,而在电网规划过程中, 网络影响更是不可避免的内容。系统可靠性指标评 价是电力系统随机生产模拟的主要内容之一[1], 在随机生产模拟计算中考虑网络的影响,对其组合 电力系统相关评价结果的合理性以及在电力系统运 行、规划等方面的应用具有重要意义。

文献[2-5]通过仿真方法实现了组合电力系统 的可靠性评价。通过仿真法可以方便地处理网络影 响,但是可能会带来较高的计算负担。对于随机生产 模拟解析算法,已提出基于负荷持续曲线^[6-8]、序列 运算[9]、时序负荷曲线[10]、负荷频率曲线[11-12]的众多 理论和算法,现有方法多仅考虑发电机侧和负荷侧 因素的影响,较少考虑网络因素。

利用关于负荷节点的组合电力系统有效负荷 持续曲线(CMELDC)进行评价的随机生产模拟解析 法[13-15],可以对网络因素进行有效考虑,从而对发输 电系统进行整体评价,但是由于该方法忽视了各负 荷点具体负荷水平的变化对系统供电能力分配方式 的影响,得到的可靠性评价结果可能存在较大偏差。 本文针对 CMELDC 法中的这一不足,采用基于负荷 比例分布的聚类方法和相关因子数据对各负荷之间 的相互关系进行描述,并结合灵敏度方法获得各个 负荷在其不同负荷区间内的等效发电机容量值分

布,从而获得更加准确的评价结果。为便于表述,首 先简介了 CMELDC 法的相关理论和方法,然后对该 方法的不足和改进方法进行了讨论分析,最后基于 所提方法对 MRBTS 系统和 IEEE-RTS 79 系统进行 随机生产模拟计算,证明了所提方法的有效性。

CMELDC 法 1

与其他随机生产模拟解析法相比,CMELDC法 不仅考虑了发电机侧的影响,而且将输电线路的影 响纳入了考虑范围。其核心思想是通过求取不同发 电机和线路可用状态组合下的负荷点最大可达功率 AP(Arrival Power)值,将发电机侧和网络侧的不同 可用状态组合影响等效为连接在各个负荷点上的一 组等效多状态机组 由这些等效多状态机组结合各 负荷点的负荷持续曲线对系统的可靠性和经济性进 行评价。其基本步骤如下。

a. 形成系统状态集。

系统状态集反映了发电机的随机故障以及线路 的随机断线影响,其中的每个状态对应一个发电机、 线路可用状态组合。假设系统内有 N₁条线路,形成 的系统状态数量为 Ns,则对于加载 i 台机组后的某个 状态 i,其状态概率为:

 $p_{s}^{i,j} = \prod_{q=1}^{i} \left[q_{g} x_{g}^{i,j} + p_{g} (1 - x_{g}^{i,j}) \right] \prod_{l=1}^{N_{l}} \left[q_{l} y_{l}^{i,j} + p_{l} (1 - y_{l}^{i,j}) \right]$ (1)

其中,pg、pl 分别为发电机g 和线路 l 发生故障的概 率; $q_g=1-p_g$; $q_l=1-p_l$; $x_g^{ij} \in \{0,1\}, y_l^{ij} \in \{0,1\}$ 分别为加 载 i 台机组后的系统状态 j 对应的发电机 g 和线路 l 的可用状态。

当发电机和线路数量较多时,状态数将会急剧 增加,考虑到多元件同时发生故障的概率极小,可以 据此对状态集进行精简.以减少状态数量。

b. 计算系统状态集对应的最大 AP 值。

收稿日期:2013-11-12:修回日期:2014-10-29

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A105)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A105)

AP 值反映了在一定的调度原则下,系统可用的 发电机和线路对负荷侧的供电能力,其求解模型的 目标函数如式(2)所示^[13]:

 $\min[\max(L_{\mu} - P_{APk})/L_{\mu}] k = 1, 2, ..., N_L$ (2) 其中, P_{APk} 为负荷节点 k 的 AP 值; L_{μ} 为负荷节点 k 的峰值负荷; N_L 为负荷点数。可以看出,式(2)表示 的目标函数体现了在平等对待各个负荷点的前提 下尽量发挥系统供电能力的原则。

结合直流潮流方程和发电机出力约束、线路有 功潮流约束,AP值的求解模型可以表示为:

$$\begin{cases} \min \lambda \\ P_{g}^{C} \leqslant \overline{P}_{g}^{C} & g = 1, 2, \cdots, i \\ \sum_{g=1}^{i} T_{g,l}^{C} P_{g}^{C} + \sum_{k=1}^{N_{i}} T_{k,l}^{L} P_{APk} = P_{l}^{line} \quad l = 1, 2, \cdots, N_{L} \\ \sum_{g=1}^{i} P_{g}^{C} = \sum_{k=1}^{N_{i}} P_{APk} \\ -\overline{P}_{l}^{line} \leqslant P_{l}^{line} \leqslant \overline{P}_{l}^{line} \quad l = 1, 2, \cdots, N_{L} \end{cases}$$
(3)

其中, P_g^c 为发电机 g 的出力; P_g^c 为发电机 g 的出力 上限; P_l^{ine} 为线路 l 传输的有功功率; $\overline{P}_l^{\text{ine}}$ 为线路 l 传 输有功功率上限; $T_{g,l}^c$, $T_{k,l}^{\text{L}}$ 分别为发电机 g 和负荷 k 对线路 l 有功功率的传递系数, $T_{g,l}^c$, $T_{k,l}^{\text{L}}$ 可由直流潮 流计算获得; N_l 为线路数; N_L 为负荷数; λ 为无单位 变量,表示($L_{ut}-P_{APt}$)/ L_{ut} 的上界。

对于系统状态集中的每一个状态,都可以得到 对应于所有负荷点的 AP 值,如此就在每个负荷点上 形成了一个以 AP 值集合为输出容量的等效多状态 发电机,其每个状态对应的概率为相应的系统状态 概率,由等效多状态发电机容量可进一步得到等效 发电机最大容量以及等效故障容量序列。

c. 可靠性评价计算。

加载完所有发电机后,通过卷积得到负荷点 k 的 等效负荷持续曲线为:

$$f_{N_{\rm s}}^k(x) = f_0^k(x) * p_{\rm s}^{N_{\rm g}}(P_{\rm FPk})$$
(4)

其中,"*"表示卷积运算;Ng为发电机总台数;f^k₀(x) 为负荷点 k 的初始负荷持续曲线;x 为该负荷点的负 荷水平;P_{FPk}为加载完所有发电机后负荷点 k 对应 的等效故障容量序列;p^{Nk}_s(P_{FPk})为 P_{FPk}对应的概率。 由 f^k_{Ng}(x)可进一步计算得到各个负荷点及整个系统 的可靠性等评价指标^[13]。

2 基于聚类和灵敏度法的 CMELDC 改进算法

从式(2)、(3)可以看到,在 CMELDC 法中,对于 同样的网络和发电机可用状态,AP 值实际上主要受 到各负荷点的峰值负荷比例影响。依据各负荷点的 峰值负荷计算 AP 值,在一定程度上反映了供电能力 的分配方式,但是由于各个负荷点的负荷存在着随

机性,当负荷比例发生变化时,对应的供电能力分配 方式会发生相应的变化,虽然这与负荷预测160、发电 调度过程[17]等诸多因素相关,但仍可通过负荷比例 来评估。以图1为例,设某个系统状态下由式(3)计 算得到负荷点1—3(峰值负荷为L_{n1}、L_{n2}、L_{n3})的AP 值为 PAPL、PAPL、PAPL、当负荷点 3 的实际负荷值为 L'n3 时,按峰值负荷比例计算的 PAPB 大于该负荷,系统出 现冗余的供电能力,所以,此时按各点实际负荷比例 计算,负荷1、2的PAP1、PAP2可以提高至P'AP1、P'AP2,PAP3 变为 P'AP3,可靠性水平与由 PAP1-PAP3 得到的相比,负 荷1、2可靠性有所提高,而负荷3可靠性有所降低, 系统整体可靠性有所提高。所以,仅通过峰值负荷比 例得到的 AP 值无法反映各点负荷水平变化时系统 供电能力分配发生改变带来的影响,由其得到的可 靠性评价结果可能存在较大偏差.AP 值计算应该考 虑以实际的负荷比例为依据。



level change

2.1 基于聚类的改进

由于实际运行中可能发生的负荷比例状态数量 庞大,不可能对其逐个进行 AP 值计算和可靠性评价。 考虑到各个负荷点的负荷比例会在一定范围内随机 分布,采用聚类方法对 CMELDC 法进行改进,通过 获取负荷比例分布的一定数量的聚类中心,使其能 考虑负荷变化的影响,具体方法如下。

设各负荷点的负荷样本集为 S_0, s_0 为 S_0 中的一 个采样,且 $s_0 = [P_1^{L} P_2^{L} \cdots P_{M_1}^{L}], P_k^{L}$ 表示负荷点k在 采样 s_0 中的负荷值。为了确保同样比例的负荷只有 一种表达方式,通过 $s'_0 = [P_1^{L} P_2^{L} \cdots P_{M_1}^{L}] / \sum_{k=1}^{N_k} P_k^{L}$ 将 S_0 转化为比例形式,可得到比例形式的样本集 S'_0, S'_0 与 S_0 — 一对应。通过聚类方式进一步得到 S'_0 规模为 N_{s_1} 的聚类中心集 $S_1,$ 对于每一个 $s'_0 \in S'_0,$ 都有其对应 的聚类中心 $s_1 \in S_1,$ 通过 S_1 可以在一定程度上反映负 荷比例的分布。

显然, Ns, 越大, 所能体现的负荷比例分布就越精确, 但是相应的计算代价也会增加, 所以需要选取一个合适的聚类中心规模。这里给出了一种获得 Ns, 的

方法:加载 *i* 台发电机后,如果 s'_0 发生变化 $\Delta s'_0$ 并且 忽略网络约束的作用,则按照负荷比例分配的系统 供电能力变化量为 $\Delta P_{AP} = \Delta s'_0 \sum_{g=1}^{i} \overline{P}_g^c$,如果设置容忍 的 AP 值误差上界为 $\Delta \overline{P}_{AP}$,则可以通过聚类平均误差 $\frac{1}{N_{s_0}} \sum_{w=1}^{N_s} \sum_{y=1}^{i} \| s'_{0w,y} - s_1^w \|_{\infty}$ 小于 $\Delta \overline{P}_{AP} / \sum_{g=1}^{i} \overline{P}_g^c$ 的条件来得 到 N_{s_1o} 其中, N_{s_0} 为 S_0 的样本数, s'_w 为第 w 个聚类中 心, n_w 为 s_1^w 对应的样本数, $s'_{0w,y}$ 为 s'_0 中 s_1^w 对应的第 y个样本, $\| \cdot \|_{\infty}$ 表示求向量的 ∞ 范数。文中聚类算 法皆采用 k_- 均值法,具体方法及步骤可见文献[18]。

因为一个负荷在处于不同负荷水平时可能面临 不同的负荷比例分布,所以考虑采用相关因子概念 来进一步描述各个负荷在不同负荷水平区域与 S₁ 中聚类中心的关联。

设负荷点 k 的负荷水平分为 N_k 段,其第 m 段的 负荷区间为 $[P_{k,m-1}^{L}, P_{k,m}^{L})$,定义其与 S_1 中第 n 个聚类 中心 s_1^n 的相关度为:

$$\eta_{k,m}^{n} = \sum_{h=1}^{N_{s}} \varphi_{h}$$

$$\varphi_{h} = \begin{cases} 1 & P_{k,m-1}^{L} \leq P_{k,h}^{L} < P_{k,m}^{L} \ \exists F_{S_{0}}(h) = n \\ 0 & \ddagger \& \end{cases}$$
(5)

其中, N_{s_0} 为 S_0 的样本数; $P_{k,h}^{L}$ 为负荷点k在 S_0 第h个采样中的值; $F_{s_0}(h)$ 表示 S'_0 中第h个采样对应的 S_1 中聚类中心序号; $\eta_{k,m}^{a}$ 体现了负荷点的某一负荷区间所相关的负荷比例样本在 s_1^{a} 处的聚类归属情况, $\eta_{k,m}^{a}$ 越大,说明该负荷区间的相关样本与 s_1^{a} 关系越密切。

进一步定义负荷点 k 第 m 个负荷段对 S_1 中第 n 个聚类中心的相关因子为 $\xi_{k,m}^n = \eta_{k,m}^n / \sum_{e=1}^{N_{s_1}} \eta_{k,m}^e$ 。则对 负荷点 k 的所有负荷段和 S_1 中的所有聚类中心进 行上述计算,可以得到各个负荷段对 S_1 的相关因子为:

$$\boldsymbol{\xi}_{k} = \begin{vmatrix} \boldsymbol{\xi}_{k,1}^{1} & \boldsymbol{\xi}_{k,2}^{1} & \cdots & \boldsymbol{\xi}_{k,N_{k}}^{1} \\ \boldsymbol{\xi}_{k,1}^{2} & \boldsymbol{\xi}_{k,2}^{2} & \cdots & \boldsymbol{\xi}_{k,N_{k}}^{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \boldsymbol{\xi}_{k,1}^{N_{s_{i}}} & \boldsymbol{\xi}_{k,2}^{N_{s_{i}}} & \cdots & \boldsymbol{\xi}_{k,N_{k}}^{N_{s_{i}}} \end{vmatrix}$$
(6)

在 CMELDC 法中加入上述聚类中心集和相关 因子概念,可以对负荷比例变化的影响进行反映,同 时建立具体负荷水平与负荷比例分布之间的关联。 由此,原算法需要进行以下调整。

a. 首先,对每一个系统状态,求得 *S*₁ 中各个聚 类中心对应的 AP 值,而不是仅仅求得峰值负荷对应 的 AP 值。在第 *j* 个系统状态下,对于第 *n* 个聚类中 心,其 AP 值求解模型(3)中相应约束变为:

$$(P_k^n - P_{APk}^{J,n}) / P_k^n \leq \lambda \tag{7}$$

其中, Pⁿ_k为 S₁ 中第 n 个聚类中心对应第 k 个负荷的 负荷水平(比例形式); P^{j,n}_{Abk} 为负荷点 k 对应第 j 个系 统状态、第n个聚类中心的AP值。

b.其次,在等效多状态机组形成过程中,将系统 状态概率和相关因子概念结合,具体如下。

负荷点 k 连接的等效多状态发电机容量为:

对于负荷点 k 的第 m 个负荷段,上述等效多状态发电机容量对应的概率为:

其中, $p_{s}^{i,j}$ 为加载*i*台机组后的系统状态*j*的状态概率。 **c.**最后,各负荷点的可靠性评价指标需要逐个

负荷段进行计算,其具体计算方法如下。

容量为 P_{kk} 的等效发电机对应的负荷点 k 第 m 个负荷段的可靠性损失,即电量不足期望值 EENS (Expected Energy Not Served)和失负荷期望值 LOLE (Loss Of Load Expected)分别为;

$$\delta_{\text{LOLE}k,m}^{j,n} = \begin{cases} 0 & P_{APk}^{j,n} \geqslant P_{k,m}^{\text{L}} \\ f_{0}^{k}(P_{APk}^{j,n}) - f_{0}^{k}(P_{k,m}^{\text{L}}) & P_{k,m-1}^{\text{L}} \leqslant P_{APk}^{j,n} \leqslant P_{k,m}^{\text{L}} \\ f_{0}^{k}(P_{k,m-1}^{\text{L}}) - f_{0}^{k}(P_{k,m}^{\text{L}}) & P_{APk}^{j,n} \leqslant P_{k,m-1}^{\text{L}} \\ \end{cases} \\ \delta_{\text{EENS}k,m}^{j,n} = \begin{cases} 0 & P_{APk}^{j,n} \geqslant P_{k,m}^{\text{L}} \\ \int_{P_{kk}^{j,n}}^{P_{k,m}^{\text{L}}} g(x) dx & P_{k,m-1}^{\text{L}} \leqslant P_{APk}^{j,n} \leqslant P_{k,m}^{\text{L}} \\ g(P_{k,m-1}^{\text{L}}) (P_{k,m-1}^{\text{L}} - P_{APk}^{j,n}) + \int_{P_{k,m-1}^{j,n}}^{P_{k,m}^{\text{L}}} g(x) dx \\ P_{APk}^{j,n} \leqslant P_{k,m-1}^{\text{L}} \end{cases}$$
(9)

其中, $g(x) = f_0^k(x) - f_0^k(P_{k,m}^L)$ 。 各负荷点的可靠性评价指标为:

$$\delta_{\text{LOLE}k} = \sum_{m=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{n=1}^{N_{s_i}} \delta_{\text{LOLE}k,m}^{j,n} p_{S^{k,j}}^{N_k j} \xi_{k,m}^n \tag{10}$$

$$\delta_{\text{EENS}k} = \sum_{m=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{n=1}^{N_{s_k}} \delta_{\text{EENS}k,m}^{j,n} p_{\text{S}^{s,j}}^{\text{N}_s j} \boldsymbol{\xi}_{k,m}^n \tag{11}$$

$$\delta_{\text{ELC}k} = \delta_{\text{EENS}k} / \delta_{\text{LOLE}k}$$
(12)

其中, δ_{ELC_k} 为负荷切除期望值 ELC(Expected Load Curtailed)。

系统整体的可靠性指标为[15]:

$$\delta_{\text{ELC}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{L}}} \delta_{\text{ELC}k} \tag{13}$$

$$\delta_{\text{EENS}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{L}}} \delta_{\text{EENS}k} \tag{14}$$

$$\delta_{\text{LOLE}} = \delta_{\text{EENS}} / \delta_{\text{ELC}}$$
 (15)

由于聚类中心的分布受到负荷样本分布的影响,当各个负荷点的负荷相关度较大时,其负荷样本 (比例形式)分布会较为密集,需要的聚类中心数量 也会较少;反之,则分布相对分散,可能需要更多的 聚类中心。并且对于前一种情况,其实际负荷比例与 负荷峰值比例差距可能相对较小,所以改进方法与 原方法评价结果差距也会相对较小。

2.2 基于灵敏度的估算方法

当 N_s,较大时,S₁对应的 AP 值计算造成的计算 负担会明显增加,所以采用一种基于灵敏度的估算 方法来获得 S₁对应的 AP 值解。

对于线性规划问题及其对偶规划问题

$$\min_{\substack{x = c^{\mathsf{T}}y \\ y = b}} \max_{\substack{x = c^{\mathsf{T}}y \\ z \ge 0}} \max_{\substack{x = c^{\mathsf{T}}y + z = c \\ z \ge 0}} \max_{\substack{x = c^{\mathsf{T}}y + z = c \\ z \ge 0}}$$
(16)

根据其最优条件,在其最优解 (y^*, v^*, s^*, z^*) 处对各变 量求微分,可以得到^[19]:

$$\begin{split} \left| \begin{aligned} \mathbf{c}^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\mathbf{y} + \mathbf{y}^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\mathbf{c} - \mathrm{d}\mathbf{z} = \mathbf{0} \\ A^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\mathbf{v} + (\mathrm{d}\mathbf{A})^{\mathrm{T}} \mathbf{v} + \mathrm{d}\mathbf{s} - \mathrm{d}\mathbf{c} = \mathbf{0} \\ A^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\mathbf{v} + (\mathrm{d}\mathbf{A}) \mathbf{y} - \mathrm{d}\mathbf{b} = \mathbf{0} \\ \mathrm{d}\mathbf{s}_{u} = \mathbf{0}, u \in \mathbf{N}_{1} = \{ u \mid y_{u} > \mathbf{0}, s_{u} = \mathbf{0} \} \\ \mathrm{d}\mathbf{s}_{u} = \mathbf{0}, u \in \mathbf{N}_{1} = \{ u \mid y_{u} > \mathbf{0}, s_{u} = \mathbf{0} \} \\ \mathrm{d}\mathbf{y}_{v} = \mathbf{0}, v \in \mathbf{N}_{0} = \{ v \mid s_{v} > \mathbf{0}, y_{v} = \mathbf{0} \} \\ \mathrm{d}\mathbf{z}_{1} \quad \mathrm{d}\alpha_{12} \quad \cdots \quad \mathrm{d}\alpha_{1q} \\ \mathrm{d}\alpha_{21} \quad \mathrm{d}\alpha_{22} \quad \cdots \quad \mathrm{d}\alpha_{2q} \\ \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \\ \mathrm{d}\alpha_{n1} \quad \mathrm{d}\alpha_{n2} \quad \cdots \quad \mathrm{d}\alpha_{nq} \\ \end{array} \right|, p \searrow q \ \mathcal{B} \end{split}$$

行、列数;**α**为由**A**的各列元素组成的列向量;s_u,y_v分 别为**s**,**y**的第 u、v 个元素。

将约束改进后的式(3)写成式(16)中的标准形式,其各负荷点负荷水平的变化只对应于A中相应 元素的变化,所以只需考虑y相对于A中元素的灵 敏度,其求解如下:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{I}_{N_0} \end{bmatrix} d\boldsymbol{y} = -\begin{bmatrix} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \otimes \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} d\boldsymbol{\alpha}$$
(18)

其中, I_{N_0} 对应于 N_0 ,表示等式约束 $dy_v=0, v \in N_0=\{v|s_v>0, y_v=0\}$;I为单位矩阵,其维数等于矩阵A的行数; "⊗"表示矩阵的 Kronecker 积。

对聚类中心集 S₁采用灵敏度估算时,首先对 S₁ 进行再聚类,求得 S₁的规模为 N_{S2}的聚类中心集 S₂, 显然,S₂的规模比 S₁小很多;然后求出 S₂中各个聚类 中心对应的 AP 值,以及 AP 值对应于各负荷点负荷 水平的灵敏度;最后通过上述 AP 值和灵敏度对 S₁中 聚类中心对应的 AP 值进行估算。N_{S2}是一个较小的 数值,可在 1~20 间取值,N_{S1}越大,N_S、取值也相应较大。

2.3 改进后的算法流程

当以可靠性评价为计算目标时,改进后的 CMELDC法计算流程如图2所示。

3 算例

分别采用 MRBTS 系统和 IEEE-RTS 79 系统进



图 2 改进 CMELDC 法流程

Fig.2 Flowchart of improved CMELDC method

行计算和分析。

3.1 MRBTS 系统算例

采用文献[13]中的 MRBTS 系统,系统网络结构 和发电机、负荷分布如图 3 所示(图中括号内数据表 示强迫停运率),发电机优先顺序从高到低依次为 G₅、 G₆-G₉、G₁₀ 与 G₁₁、G₁ 与 G₂、G₃、G₄,系统具体线路参 数见文献[20]。分别基于 2 个不同的负荷样本进行 计算,负荷样本 1 中系统各负荷节点的负荷根据图 3 中节点负荷峰值和文献[21]中年典型负荷数据调整 得到,具体方法为对年典型负荷数据的 24 h 分布、周 分布、年分布进行参数调整,形成各负荷节点有所差



别的典型负荷数据,以避免采用同样的典型负荷数 据导致各负荷节点负荷水平比例固定,结合各负荷节 点的典型负荷数据和负荷峰值得到一年中各负荷节 点小时负荷组合的时序样本(8736个),其部分负荷 时序曲线如图4所示。负荷样本2中各负荷点负荷 服从独立正态分布,分布参数如表1所示,参照正态 分布的3σ(σ为负荷标准差)准则,设负荷标准差约 为负荷峰值与期望值之差的1/3,通过随机采样获得 各负荷节点负荷组合的10000个非时序样本。与负 荷样本1相比,负荷样本2的各负荷之间具有更低 的相关度,其负荷水平比例分布也更加分散。



节点	期望值/MW	标准差/MW	节点	期望值/MW	标准差/MW
2	15	1.5	4	30	3.0
3	68	5.0	5	35	1.5

分别用 CMELDC 原算法、改进 CMELDC 法和蒙 特卡罗模拟法进行试算,比较其可靠性评价结果。系 统状态只考虑线路的单回故障,并且只考虑概率高 于 10⁻⁶ 的状态,总状态数为 483。聚类参数负荷样本 1 取 $\Delta \bar{P}_{AP}$ = 0.5 MW, N_{S_1} = 50, N_{S_2} = 2;负荷样本 2 取 $\Delta \bar{P}_{AP}$ = 0.5 MW, N_{S_1} = 1000, N_{S_2} = 5。各负荷点负荷水平 分段步长为 1 MW。在 CPU 2.8 GHz, 内存 2 G 的 PC 机上采用 MATLAB 编程计算。

图 5 给出了负荷样本 1 的改进 CMELDC 法计算过程中,某一系统状态下节点 2 在负荷 10 MW 处





以及 15 MW 处对应的 AP 值-相关因子分布,可以看 到 AP 值在区间 [14.5.15.5] MW 内呈离散分布,并对 应不同的相关因子值。由于图中 AP 值对应的是聚 类中心集 S1.其原始负荷样本集计算得到的 AP 值分 布区间将更大。可以看到,15 MW 处(浅色)的 AP 值-相关因子分布与 10 MW 处(深色)有明显的不 同,对于相同的 AP 值水平(通常对应同一个聚类 中心),两者的相关因子值具有明显的差别,以图 中 AP 值 15.04 MW 对应的某个聚类中心为例,其在 15 MW 处对应的相关因子为 0.023 71. 而在 10 MW 处对应的相关因子为 0.01517,这反映了在不同的负 荷水平下,可能实现的负荷水平比例分布的差别。同 时,对某一负荷水平而言,由 AP 值-相关因子分布得 到的可靠性指标应为一系列值的加权(对应相关因 子)和。对于该负荷水平,不同的 AP 值可能意味着不 同的可靠性损失情况,由此得到的可靠性指标是这 些信息的综合,而如果采用单一的 AP 值进行评价, 则无法反映其中的差别,可能导致较大的误差。

表 2 给出了对负荷样本 1 由 3 种方法得到的可 靠性评价结果,相对于负荷样本 2,负荷样本 1 各负 荷的相关度较高。改进前后的 CMELDC 法在各项指 标数值大小上各有参差,改进 CMELDC 法虽然在系 统整体指标上较改进前有明显减小,但其得到的其 余可靠性指标并未出现一致的减小,这是因为在更 多地考虑系统供电能力分配调整后,一些节点的可 靠性水平可能会有所提高,另一些则有所下降。与蒙 特卡罗法结果比较,对于负荷样本 1,改进前后的 CMELDC 法在各项指标上与其接近程度同样各有参 差,虽然改进后可靠性指标值总体上更加接近,但并 不显著。

表 2 可靠性指标计算结果比较

Table 2 Comparison of calculated reliability indexes					
可靠性指标	改进 CMELDC 法	CMELDC 法	蒙特卡罗法		
节点 2 EENS	0.003 19	0.003 82	0.00304		
节点 3 EENS	0.03335	0.05135	0.04015		
节点 4 EENS	0.00648	0.00486	0.00618		
节点 5 EENS	0.01506	0.01008	0.00674		
系统 EENS	0.05808	0.07011	0.05610		
节点 2 LOLE	0.003 60	0.00402	0.00330		
节点 3 LOLE	0.00576	0.00989	0.00599		
节点 4 LOLE	0.003 87	0.00233	0.00338		
节点 5 LOLE	0.00592	0.00418	0.00339		
系统 LOLE	0.00533	0.00659	0.00599		

注:EENS 指标单位为 MW·h/d,LOLE 指标单位为 h/d;后同。

表3给出了负荷样本2的相关可靠性评价结 果。显然,负荷服从独立正态分布时,各负荷之间的 相关度有明显降低,通过比较表2、表3可以看到, 在负荷相关度降低的情况下,改进CMELDC 法在计 算结果准确度方面表现出了更明显的优势,其得到

表 3 负荷正态分布下的计算结果

Table 3	Calculated	results	for	loads	with	normal	distribution

可靠性指标	改进 CMELDC 法	CMELDC 法	蒙特卡罗法
节点 2 EENS	0.00531	0.007 53	0.00463
节点 3 EENS	0.07766	0.09056	0.09648
节点 4 EENS	0.00972	0.02096	0.01030
节点 5 EENS	0.03896	0.10704	0.01237
系统 EENS	0.13164	0.22608	0.12378
节点 2 LOLE	0.00686	0.00821	0.00540
节点 3 LOLE	0.01204	0.01728	0.01245
节点 4 LOLE	0.00592	0.00988	0.00554
节点 5 LOLE	0.01217	0.04340	0.00556
系统 LOLE	0.01091	0.02104	0.01245

的结果更加接近蒙特卡罗法。

此外,与蒙特卡罗法结果比较,上述 2 个负荷样本均出现了节点可靠性指标计算结果偏差很大的现象,在后面的 IEEE-RTS 79 系统算例中亦如此。这主要由两方面因素导致:一方面是因为所用算例在蒙特卡罗法计算过程中,相同效果下切负荷选择存在一定的优先顺序;另一方面是因为虽然考虑了负荷水平变化对系统供电能力分配的影响,但仍有许多影响可靠性结果的细节被忽视,这同时也是系统总体指标存在偏差的主要原因。

对负荷样本 1 采用不同的 ΔP_{AP} 得到不同的 N_{S_1} ,并改变 N_{S_2} 值进行计算,得到结果如表 4 所示。 ΔP_{AP} 的减小与相应的 S_1 规模的增大有助于更加准确地反映 AP 值分布,但达到一定规模以后影响就不再显著,结合表 1 中结果可以看到,对于上述算例, N_{S_1} 达到 50 以上其造成的影响已较小。同时,通过比较 N_{S_1} 为 10 与 100 时, N_{S_2} =2 与 N_{S_2} = $N_{S_1}(S_2$ = S_1)2 种情况下的计算结果,可以看到灵敏度估算方法下的可靠性评价结果可以达到较为满意的精度。

祝 + 「「「「秋天」」 S 」 「」 「 并 拍 小	「同聚类参数下的	り计算结果
-----------------------------	----------	-------

Table 4 Calculated results for different clustering parameters

	$N_{S_1} = 10$	$N_{S_1} = 100$	$N_{S_1} = 10$	$N_{S_1} = 100$
可靠性	$N_{S_2}=2$	$N_{S_2} = 2$	$N_{S_2} = 10$	$N_{S_2} = 100$
指怀	$\Delta P_{\rm AP} = 0.8 {\rm MW}$	$\Delta P_{\rm AP} = 0.4 \text{ MW}$	$\Delta P_{\rm AP}$ =0.8 MW	$\Delta P_{\rm AP}$ =0.4 MW
节点 2 EENS	0.00326	0.00316	0.00326	0.00316
节点 3 EENS	0.03203	0.03327	0.03204	0.03328
节点 4 EENS	0.00776	0.00649	0.007 82	0.00657
节点 5 EENS	0.01664	0.01505	0.01661	0.01503
系统 EENS	0.05968	0.05797	0.05972	0.05804
节点 2 LOLE	0.00370	0.003 57	0.00371	0.00358
节点 3 LOLE	0.00559	0.00576	0.005 59	0.00576
节点 4 LOLE	0.00438	0.003 81	0.00441	0.003 85
节点 5 LOLE	0.00657	0.005 87	0.00657	0.00587
系统 LOLE	0.00547	0.00531	0.00547	0.00531

以线路 4-5 断开一回、G。停运的系统状态为例, 进一步对灵敏度法估算 AP 值的准确性进行分析, 聚类参数取 $\Delta \bar{P}_{AP}$ =0.5 MW, N_{S_1} =50, N_{S_2} =2。对于 S_2 中 的一个聚类中心 s_2 =[0.106 0.485 0.199 0.210](比例形 式),其各负荷点 AP 值为[0.250 1.139 0.468 0.493] (标幺值,基准为 100 MW),由 2.2 节方法得到灵敏 度矩阵为:

	2.100	-0.250	-0.250	-0.250
G=	-1.139	1.211	-1.139	-1.139
	-0.468	-0.468	1.882	-0.468
	-0.493	-0.493	-0.493	1.857

从而可以对 S₁ 中相关的聚类中心 s₁=[0.105 0.479 0.197 0.219]估算各负荷点 AP 值如下:

0.250		0.247
1.139	$+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{s}_{1}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{s}_{2}^{\mathrm{T}})=$	1.125
0.468		0.463
0.493		0.515

将 S₁ 中所有聚类中心的 AP 值估算结果与精确 计算结果进行比较,得到各负荷点的 AP 值平均绝对 百分误差分别为 0.201%、0.065%、0.098%、0.233%, 可见 AP 值估算结果具有较高精度。

在计算耗时方面,对于负荷样本1,CMELDC法为10s,改进CMELDC法在N_s=50、N_s=2情况下为92s,蒙特卡罗法采样次数为10⁵时耗时215s。可见由于需要考虑更多的负荷比例分布状态,即使采用了灵敏度估算的方法,计算耗时还是较原方法有较大增加,但是当系统较小时,相比蒙特卡罗法,改进CMELDC法的计算速度仍有一定优势。

3.2 IEEE-RTS 79 系统算例

采用 IEEE-RTS 79 系统进行计算,该系统包含 24 个节点、34 条支路、32 台发电机和 17 个负荷点, 其中支路 7-8 采用双回线路以防止 N-1 解列,各节 点负荷服从独立正态分布,同样参照正态分布的 3σ 准则,设定各负荷点的负荷期望值为该点负荷峰 值的 3/4,标准差为该点负荷峰值的 1/12,通过随机 采样获得各负荷节点负荷组合的 10000 个非时序样 本,包括负荷峰值在内的系统具体参数见文献[21]。 为减小状态集规模,系统状态同样只考虑线路的单 回故障,且只考虑概率高于 10⁻⁶ 的状态,总状态数为 16 132,聚类参数取 $\Delta \bar{P}_{AP}$ =26 MW, N_{S_1} =1 000, N_{S_2} =2, 各负荷点负荷水平分段步长为 1 MW。采用 3 种方法 得到计算结果如表 5 所示。

由表 5 结果可以看到,在系统规模有所增大的 情况下,与 CMELDC 原算法相比,改进 CMELDC 法 仍然表现出计算结果准确度方面的优势,其所得结 果更加接近蒙特卡罗法结果,尤其是在系统总体指 标计算方面。同时,由于系统规模的增大,需考虑的 系统状态显著增多,这使得改进 CMELDC 法的计算 耗时达到了 570 s,而蒙特卡罗法采样次数为 2×10⁵ 时耗时约 600 s,可以推断,随着系统规模的增大, 改进 CMELDC 法速度方面的优势有逐渐丧失的可 能,因此,该方法更加适用于规模在一定范围内的系 统,而系统状态的优选将进一步改善该方法的效率 和适用性。

	表 5 IEEE	E-RTS 7	9系	统计算结果	
Table 5	Calculated	results	for	IEEE-RTS 79	system

可靠性指标	改进 CMELDC 法	CMELDC 法	蒙特卡罗法
节点 1 EENS	0.11347	0.21088	0.04816
节点 2 EENS	0.10146	0.19514	0.04431
节点 3 EENS	0.08534	0.33706	0.08129
节点 4 EENS	0.08293	0.15749	0.03404
节点 5 EENS	0.09948	0.15749	0.03178
节点 6 EENS	0.098 52	0.24844	0.05966
节点 7 EENS	0.10767	0.24636	0.05663
节点 8 EENS	0.08909	0.309 50	0.07714
节点 9 EENS	0.08761	0.32543	0.07768
节点 10 EENS	0.08293	0.36793	0.09164
节点 13 EENS	0.07552	0.50539	0.12291
节点 14 EENS	0.08261	0.41062	0.08775
节点 15 EENS	0.07678	0.593 57	0.14490
节点 16 EENS	0.10764	0.18598	0.044 52
节点 18 EENS	0.07839	0.68616	0.15424
节点 19 EENS	0.08506	0.35121	0.08186
节点 20 EENS	0.10795	0.25787	0.05776
系统 EENS	1.56245	5.51570	1.29629
节点 1 LOLE	0.02869	0.04776	0.01320
节点 2 LOLE	0.02867	0.04944	0.01320
节点 3 LOLE	0.01505	0.04669	0.01320
节点 4 LOLE	0.03025	0.05268	0.01320
节点 5 LOLE	0.03619	0.04417	0.01320
节点 6 LOLE	0.02137	0.04595	0.01320
节点 7 LOLE	0.02477	0.04820	0.01320
节点 8 LOLE	0.01644	0.04517	0.01320
节点 9 LOLE	0.01579	0.04574	0.01320
节点 10 LOLE	0.01376	0.04624	0.01320
节点 13 LOLE	0.00987	0.04691	0.01320
节点 14 LOLE	0.01375	0.05185	0.01320
节点 15 LOLE	0.00871	0.04644	0.01320
节点 16 LOLE	0.02935	0.04631	0.01320
节点 18 LOLE	0.00854	0.05024	0.01320
节点 19 LOLE	0.01503	0.04839	0.01320
节点 20 LOLE	0.02407	0.04918	0.01320
系统 LOLE	0.01735	0.04774	0.01320

4 结论

60

本文在 CMELDC 法基础上,采用基于聚类的方 法对各负荷点负荷水平之间的相互关系进行描述, 形成了反映不同负荷比例分布的聚类中心,并结合 灵敏度方法对聚类中心处的 AP 值进行估算,从而形 成连接于负荷处的等效多状态发电机,采用相关因子 概念反映节点负荷水平与负荷比例分布间的关联, 进而对系统的可靠性指标进行评价。算例表明,与原 算法相比,改进后的算法在计算结果准确性方面有 所提高,在负荷相关度较低的情况下其效果更加明 显;同时,在一定的系统规模内,其在计算速度方面 相比蒙特卡罗法具有较明显的优势,可应用于组合 电力系统的可靠性评价计算及电网规划过程。

由于可靠性损失多发生于负荷较高的情况下, 所以对高负荷区段内的负荷分布情况有针对性地加 强描述,可有望进一步提高可靠性指标计算的准确 性,并降低计算负担。同时,采用有效的系统状态优 选方法,可有望减小涉及的系统状态集规模,从而提 高计算效率和适用性。

参考文献:

- 王锡凡,王秀丽.随机生产模拟及其应用[J]. 电力系统自动化, 2003,27(8):10-15.
 WANG Xifan,WANG Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(8):10-15.
- [2] BILLINTON R,LI W. A Monte Carlo method for multi-area generation system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4): 1487-1492.
- [3] 姜文,严正. 含风电场的发输电组合系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):5-9.
 JIANG Wen,YAN Zheng. Reliability assessment of composite generation and transmission system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):5-9.
- [4] 徐国丰,黄民翔,韩辉,等. 基于 RAMSES 的特高压电网可靠性 充裕度评估[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):99-102.
 XU Guofeng,HUANG Minxiang,HAN Hui,et al. Reliability adequacy evaluation based on RAMSES for UHV power grid [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):99-102.
- [5] 刘洋,周家启. 计及气候因素的大电力系统可靠性评估[J]. 电力 自动化设备,2003,23(9):60-62. LIU Yang,ZHOU Jiaqi. Incorporating weather effect in bulk power system reliability evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9):60-62.
- [6] BOOTH R R. Power system simulation model based on probability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1972, PAS-91(1):62-69.
- [7] WANG X. Equivalent energy function approach to power system probabilistic modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988,3(3):823-829.
- [8] STREMEL J P, JENKINS R T, BABB R A, et al. Production costing using the cumulant method of representing the equivalent load curve[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980,99(5):1947-1956.
- [9] 康重庆,夏清,相年德,等.随机生产模拟的序列化分析[J].中国电机工程学报,2002,22(4):8-12.
 KANG Chongqing,XIA Qing,XIANG Niande,et al. Sequence-based analysis of probabilistic production cost simulation[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(4):8-12.
- [10] 夏清,王少军,相年德.时序负荷曲线下电力系统概率性生产模拟[J].中国电机工程学报,1994,14(3):21-28.
 XIA Qing,WANG Shaojun,XIANG Niande. The probabilistic power system production simulation based on chronological load curve[J]. Proceedings of the CSEE,1994,14(3):21-28.
- [11] MICHAEL G. The inclusion of dynamic factors in statistical power system cost models, part I; assessment of start-up and banking costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4 (2):419-425.
- [12] 张节潭,程浩忠,胡泽春,等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报,2009,29(28):34-39.
 ZHANG Jietan,CHENG Haozhong,HU Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms
 [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(28):34-39.

- [13] CHOI J, BILLINTON R, FUTUHI-FIRUZABED M. Development of a new nodal effective load model considering of transmission system element unavailabilities [J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission & Distribution, 2005, 152(1); 79-89.
- [14] CHOI J, TRAN T, EL-KEIB A, et al. A basic method for composite power system expansion planning considering probabilistic reliability criteria[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005. Saskatoon, Canada: IEEE, 2005: 502-507.
- [15] KYEONGHEE C, JEONGJE P, TAEGON O, et al. Probabilistic reliability criterion for expansion planning of grids including wind turbine generators [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011. San Diego, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [16] 陈昊. 基于非高斯分布 GARCH 模型的负荷预测[J]. 电力自动 化设备,2008,28(7):65-68.

CHEN Hao. Load forecast based on GARCH model with non-Gaussian distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(7):65-68.

- [17] 韩学山,柳焯. 考虑机组爬坡速度和网络安全约束的经济调度 解耦算法[J]. 电力系统自动化,2002,26(13):32-37. HAN Xueshan, LIU Zhuo. Decoupled economic dispatch including unit ramp rate and network security constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 32-37.
- [18] 杨杰,姚莉秀. 数据挖掘技术及其应用[M]. 上海:上海交通大 学出版社,2011:171-176.
- [19] 龙巧云. 线性规划问题局部灵敏度分析的一个新方法[J]. 湘潭

师范学院学报,2008,30(1):11-13.

LONG Qiaoyun. A new method for local sensitivity analysis in linear programming problem [J]. Journal of Xiangtan Normal University, 2008, 30(1): 11-13.

- [20] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.
- [21] The Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979,98(6):2047-2054.

作者简介:



谈天夫

谈天夫(1984-),男,江苏苏州人,博士 研究生,研究方向为电力系统规划(E-mail: tantianf@163.com):

山(1973-),男,山东济南人,副教 高 授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力 系统规划与优化运行、人工智能在电力系统 中的应用(E-mail:shangao@seu.edu.cn);

李海峰(1973-),男,河北怀安人,高级 工程师,博士,主要研究方向为电网运行与控制:

罗建裕(1961-),男,江苏无锡人,高级工程师.主要研究 方向为电力系统安全稳定分析。

Improved composite power system equivalent load duration curve method considering variation of load distribution

TAN Tianfu¹, GAO Shan¹, LI Haifeng², LUO Jianyu²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210014, China)

Abstract: Since the reliability evaluation error of the CMELDC(Composite power system Equivalent Load Duration Curve) method is induced by the neglect of load level change, an improved CMELDC method is introduced, which adopts the clustering method based on the load proportional distribution to describe the load change, uses the sensitivity method to calculate the maximum arrival power of each load point according to the clustering center set, and applies the correlation factor to reflect the correlation between node load level and load proportional distribution. The results of case study for MRBTS system and IEEE-RTS 79 system show that, the improved method has higher accuracy in the reliability index evaluation, especially when the correlation between load nodes is low.

Key words: electric power systems; electric loads; probabilistic production simulation; maximum arrival power; clustering algorithms; correlation factor; sensitivity analysis