DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.161548

基于传输点容量模型的发输电系统 可靠性评估

祝锦舟1 张 焰1 王赛一2 华月申2

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 2002402. 国网上海市电力公司 上海 200122)

摘要 利用发输电组合系统(简称组合系统)极限输电能力与负荷解耦(系统—负荷解耦) 的特性,能有效提高组合系统可靠性的评估效率。目前已有的基于系统—负荷解耦分析的组合系 统可靠性评估方法尚存在不足,其中的输电能力计算模型没有考虑异常状态下优化负荷削减的实 际需求,也没有计及各不同传输点负荷水平变化的影响,此外,对于频率及持续时间型可靠性指 标的计算方法,目前也鲜有研究。该文以系统—负荷解耦分析为出发点,提出基于传输点容量模 型的组合系统可靠性评估方法。首先,建立一种适用于组合系统可靠性分析的传输点输电能力优 化决策模型,并针对该模型目标函数具有斜率递增的特点,将其转换为线性规划模型进行求解, 保证计算效率。然后,拓展传统发电系统可靠性评估中可用容量状态概率及增量频率的概念,基 于马尔科夫链构建组合系统各传输点输电能力的概率—频率分布函数(即传输点容量模型),将其 与相应负荷的概率—频率分布函数(即负荷模型)进行卷积和加法运算,不仅能得到组合系统及 其传输点的概率型可靠性指标,而且还能得到频率及持续时间型等可靠性指标。以RBTS-6 节点 系统为例进行测试分析,说明该方法的有效性。

关键词:可靠性 输电能力 概率—频率分布 传输点容量模型 卷积 中图分类号:TM711

A Method for Composite Power System Reliability Evaluation Based on Delivery Point Capability Model

Zhu Jinzhou¹ Zhang Yan¹ Wang Saiyi² Hua Yueshen² (1. School of Electronic Information and Electrical Engineering Shanghai Jiao Tong University Shanghai 200240 China

2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company Shanghai 200122 China)

Abstract The efficiency of the composite power system (CPS) reliability evaluation can be improved effectively by using the decoupling characteristics between CPS transfer capability and corresponding load (system-load decoupling). There are still some technical defects in the existing methods based on system-load decoupling. Existing transfer capability calculation models consider neither the optimal load shedding under abnormal conditions nor the change of the load level of each delivery point. In addition, there are few researches on the calculation methods of frequency and duration reliability index. By using the system-load decoupling characteristics, a method for CPS reliability evaluation based on delivery point capability model is proposed. Firstly, an optimal

国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA050203)和国家电网公司科技项目(52092114001G)资助。 收稿日期 2016-09-19 改稿日期 2017-04-14

decision-making model is presented for calculating delivery points transfer capability of CPS, which is suitable for reliability evaluation. Given that the objective function of the presented optimal model has successively increasing slopes, the corresponding nonlinear model is transformed into a linear programming model to be solved to enhance the computational efficiency. Then, the probability-frequency distribution function of delivery point transfer capability, also named delivery point capability model, is built based on Markov chain by extending the concept of state probability and incremental frequency already used for modeling available capability of generation. Not only the probability but also the frequency and duration reliability index of delivery points and CPS can be obtained by convolution and addition operation between delivery point capability models and corresponding load models. The analysis for RBTS-6 test system demonstrates the validity of the proposed method.

Keywords: Reliability, transfer capability, probability-frequency distribution, delivery point capability model, convolution

0 引言

发输电组合系统(简称组合系统)负荷数量较 多,负荷波动范围较大,如果应用目前常用的模拟 法^[1-4]或解析法^[5]对其进行可靠性评估,则当考虑负 荷的不确定性(负荷状态)时,由于状态空间的急 剧增大,将导致可靠性评估效率显著下降。

针对上述问题,已有一些研究提出了基于系统 一负荷解耦分析的组合系统可靠性评估方法[6-14], 主要是利用组合系统极限输电能力与负荷解耦的特 性,构建组合系统输电能力的随机模型(通常为概 率分布模型),并将其与相应负荷的随机模型进行互 动分析 (如卷积),来实现组合系统的可靠性评估。 因在系统—负荷解耦分析中无需再对负荷状态逐一 进行分析,所以可以有效提高组合系统可靠性评估 的效率,并且所得组合系统输电能力的随机模型还 可作为下级电网(一般为配电网)的等效电源模型, 适应下级电网可靠性评估的需求。其中,输电能力 的计算是上述系统一负荷解耦分析方法得以应用的 基础。文献[6,7]基于组合系统正常或事故状态下各 传输点^[1](delivery points, *D*_P)的输电能力(transfer capability of delivery point, *D*_{TC}), 提出将组合系统 等效为连接在各传输点上的多状态发电机的分析方 法,为组合系统乃至全电压等级系统的可靠性评估 提供了思路。但上述研究中没有给出适用于可靠性 评估的传输点输电能力的计算方法。文献[8-12]提 出了组合系统等效负荷持续曲线(Composite Power System Effective Load Duration Curves, CMELDC) 法,并构建了计算组合系统各传输点输电能力的鲁 棒优化决策模型,通过将输电能力与组合系统状态 概率相结合,得到输电能力随机变量的概率分布模 型,并将其与负荷概率分布进行卷积计算,能有效 提高组合系统可靠性评估的效率。但其中的输电能 力鲁棒优化模型实际上是按等比例增长负荷的方式 计算各传输点输电能力的,忽视了各传输点负荷水 平变化对系统输电能力分配策略的影响,且没有考 虑组合系统异常状态下优化负荷削减的实际需求[15], 若以该模型的输电能力计算结果与负荷进行解耦分 析,得到的可靠性评估结果可能存在较大偏差,而 且当负荷需求较大、输电网资源有限,造成网络阻 塞问题时,等比例的负荷增长方式可能还会造成可 靠性评估误差的进一步增大,因此该输电能力计算 方法难以适用于可靠性评估。文献[13]对传输点输 电能力的计算方法进行了改进,但其主体仍然是等 比例增长负荷的方式。文献[14]在 CMELDC 法的基 础上,应用负荷比例分布的聚类方法及灵敏度分 析,获得各传输点在其负荷变化区间内的输电能力, 能在一定程度上反映各传输点负荷水平的不确定性 对输电能力分配策略的影响,但该方法需要针对各 传输点的不同负荷区间分别进行计算,未能实现组 合系统与相应负荷的解耦分析,计算量较大,难以 有效发挥 CMELDC 法的优势。

相比于概率型指标,频率及持续时间型指标能 更完善地描述组合系统的可靠性,而且组合系统可 靠性的频率及持续时间型指标对于下级电网(一般 为配电网)的可靠性分析也具有重要意义^[6,7,16,17]。 然而,文献[8-14]等相关研究中均未给出频率及持 续时间型可靠性指标的计算方法。文献[6,7]将具有 相同输电能力的状态进行合并,通过计算不同合并 状态的转出频率来实现频率型指标的计算,但该方 法会遗失不同合并状态间的转移信息,难以应用于 累计频率^[18]的计算。在马尔科夫链基础上,计及状 态概率及增量频率^[18]的概率一频率分布函数法^[19-21] 能够巧妙地实现状态合并,避免频率型可靠性指标 的重复累计问题,得到供电不足的频率及平均持续 时间等可靠性指标,但目前相关研究还主要集中于 发电系统的可靠性评估,涉及组合系统可靠性的研 究尚较少。

综上所述, 在利用组合系统输电能力与负荷解 耦特性开展的组合系统可靠性评估研究中,已有的 组合系统传输点输电能力计算方法难以有效地适用 于可靠性分析,并且频率及持续时间型可靠性指标 的计算方法也存在不足。针对上述问题,本文以组 合系统传输点输电能力及相应负荷的解耦分析(系 统一负荷解耦分析)为出发点,提出基于传输点容 量模型的组合系统可靠性评估方法。首先,建立一 种适用于组合系统可靠性分析的传输点输电能力优 化决策模型,作为构建传输点容量模型的基础,并 对优化决策模型的计算方法进行研究,以提高计算 效率。其次,应用状态概率及增量频率的概念,通 过将组合系统不同状态的概率及状态间的转移率与 相应状态下各传输点的输电能力相结合,构建组合 系统各传输点输电能力的概率—频率分布函数,即传 输点容量模型,并应用相同的概念构建相应负荷的概 率一频率分布函数,即负荷模型。然后,通过传输点 容量模型与负荷模型的卷积和加法运算,求得包括概 率型、频率及持续时间型等指标在内的组合系统及其 传输点的可靠性指标。最后,以RBTS-6节点系统为 例进行测试分析,论证本文所提方法的有效性。

1 传输点输电能力优化决策模型

1.1 模型建立

1.1.1 目标函数

传输点输电能力 Drc 的计算是构建传输点容量 模型的基础,其取决于组合系统各设备(发电机、 变压器及输电线路等)的可用状态、电网拓扑结构、 运行约束及运行策略等因素^[8-15]。针对目前可靠性 评估中输电能力计算模型的不足,本文以最优负荷 削减为目标,构建组合系统状态 s 下 Drc 的优化决 策模型。相应的目标函数如式(1)~式(3)所示。

$$J = \min F(G(s), D_{TC}(s))$$

= min $\sum_{i \in N_D} (C_{1i}(D_{TCi}(s)) + C_{2i}(D_{TCi}(s)))$ (1)

式中,在组合系统状态 s下, G(s)为发电机有功出 力 $G_{j}(s)$ 的列向量, $j \in N_{G}$, N_{G} 为发电机组集合; N_{D} 为组合系统的传输点集合; $D_{TCi}(s)$ 为传输点 i(D_{Pi})的输电能力; $D_{TCi}(s)$ 为 $D_{TCi}(s)$ 的列向量; C_{1i} 为 D_{Pi} 的切负荷损失成本(期望值),表示最优负荷 削减的目标,如式(2)所示; C_{2i} 为 $D_{TCi}(s)$ 的自由 增长函数,如式(3)所示; $i \in N_D$ 。

$$\begin{cases} C_{1i} \left(D_{\text{TC}i}(s) \right) = \alpha_i(s) E_{\text{C}i}(s) \\ E_{\text{C}i}(s) = \int_{D_{\text{TC}i}(s)}^{+\infty} \left(y - D_{\text{TC}i}(s) \right) \varphi_{L_i}(y) dy \end{cases}$$
(2)

式中, $E_{Ci}(s)$ 为 D_{Pi} 负荷削减量的期望值; $\varphi_{L_i}(y)$ 为 D_{Pi} 处负荷 L_i 取值为 y 的概率密度,可由负荷预测 或后文的负荷模型得到; $\alpha_i(s)$ 为 D_{Pi} 削减负荷的单 位损失价值,可根据各传输点实际的负荷削减成 本、负荷的重要程度或临近负荷削减原则^[15]设定; 当依据临近负荷削减原则设定时, $\alpha_i(i \in N_D)$ 与相应 的组合系统状态 s 有关,特别当各 D_{Pi} 的 α_i 取值相 同时,式(1)可等效视为以负荷削减量最小为优化 目标。

$$C_{2i}(D_{\mathrm{TC}i}(s)) = \begin{cases} 0 & D_{\mathrm{TC}i}(s) \leq L_{i\max} \\ -\beta_i D_{\mathrm{TC}i}(s) & D_{\mathrm{TC}i}(s) > L_{i\max} \end{cases}$$
(3)

式中, L_{imax} 为 D_{Pi} 负荷的最大可能值; C_{2i} 表示当 $D_{TCi}(s)$ 能 完 全 满 足 D_{Pi} 的 负 荷 需 求 时 , 即 $D_{TCi}(s) > L_{imax}$ 时, $D_{TCi}(s)$ 以 β_i 为边界效益进行自由增 长; β_i 为 $D_{TCi}(s)$ 的自由增长边界效益因子。

由式(1)~式(3)可知,J表现为最优负荷削减的形式,计及了各传输点负荷水平的不确定性(概率分布)对系统输电能力分配策略的影响,所求得的 **D**_{rc}(s)是组合系统状态 s 下符合相应优化目标期 望的最优的输电能力分配结果。

1.1.2 约束条件

为提高模型计算效率并保证其可行性,本文基 于直流潮流构建系统运行约束。若须考虑无功功率 的影响,可参考文献[22]所述方法,构建计及无功 功率影响的改进直流潮流(线性)约束条件。

系统应满足的有功平衡约束如式(4)所示。

$$P_i(\boldsymbol{\theta}(s)) = \sum_{j \in i} G_j(s) - D_{\mathrm{TC}i}(s) \quad i \in N_{\mathrm{B}}$$
(4)

式中, $N_{\rm B}$ 为组合系统的节点集合; $j \in i$ 表示机组 j 向节点 i 注入功率; 组合系统状态 s 下, $\theta(s)$ 为节点 相角所构成的向量; P_i 为节点 i 的注入功率。

系统应满足的不等式约束如式(5)所示。

$$\begin{cases} G_j^{\text{Min}} \leqslant G_j(s) \leqslant G_j^{\text{Max}} & j \in N_{\text{G}} \\ \left| T_l(\boldsymbol{\theta}(s)) \right| \leqslant T_l^{\text{Max}} & l \in N_{\text{L}} \\ D_{\text{TC}i}^{\text{Min}} \leqslant D_{\text{TC}i}(s) \leqslant D_{\text{TC}i}^{\text{Max}} & i \in N_{\text{D}} \end{cases}$$
(5)

式中, G_j^{Max} 和 G_j^{Min} 分别为机组 j 有功出力的上、 下限; N_L 为组合系统支路集合; $D_{\text{TC}i}^{\text{Max}}$ 和 $D_{\text{TC}i}^{\text{Min}}$ 分别为 $D_{\text{P}i}$ 有功输电的上、下限; T_i^{Max} 为输电线路 l的有功潮流限值; T_i 为输电线路 l的有功潮流。

式(1)~式(5)即构成了组合系统传输点输 电能力优化决策模型。

1.1.3 模型的求解思路

由式(1)~式(3)所示的目标函数可知,组 合系统传输点输电能力优化决策模型为非线性规划 模型。求解非线性规划模型的方法较多,包括传统 的数学方法^[23]和新兴的智能算法^[24]等,但针对上述 模型的求解都具有较高的计算复杂度和时间成本。 通过证明(见附录)可以发现,在合理设置边界效 益因子β_i(*i*∈N_D)取值(如取极小值)的情况下,式 (1)~式(3)所示目标函数具有斜率递增的特点。 鉴于分段线性规划模型求解斜率递增(非线性)目标 函数时所具有的优势^[25,26],本文提出将式(1)~式 (5)所示优化决策模型转换为分段线性规划模型(详 见 1.2 节)的方法,进而可基于针对递增斜率的分 段线性规划方法^[25,26]求解转换后的分段线性规划模 型,提高相应模型优化求解的效率。

1.2 模型的转换

组合系统状态 s 下,式(1)~式(3)所示目标 函数中的 C_{1i} 、 $C_{2i}(i \in N_D)$ 均为单(决策)变量函数, 因此可知式(1)具有如式(6)的形式。

$$J = \min_{X} \sum_{X \in X} F_X(X) \tag{6}$$

式中, *X* 为关于决策变量 $G_j(s)(j \in N_G)$ 以及 $D_{TCi}(s)(i \in N_D)$ 的列向量; F_X 为相应的函数, 其中, 当 *X*= $D_{TCi}(s)(i \in N_D)$ 时, $F_X=C_{1i}+C_{2i}$; 当 *X*= $G_j(s)(j \in N_G)$ 时, $F_X=0$ 。

将 X 分段,分段点如式(7)所示(传输点输 电能力的初始点一般设为0)。

$$X_{(1)} = 0 < X_{(2)} < \dots < X_{(N_X)} < X_{(N_X+1)}$$
(7)

式中, N_x为 X 的分段数; N_x+1 为 X 的分段点数。

当 *X*_(*h*) ≪*X* ≪*X*_(*h*+1)时,称 *X* 处于第 *h* 分段。若 *F_X*在 *X* 第 *h* 分段中的斜率为 *A_{X(h}*,则 *F_X*的分段线 性函数如式 (8) 所示。

$$\begin{cases} F_X(X) = F_X(X_{(h)}) + A_{X(h)}(X - X_{(h)}) \\ X_{(h)} \leq X \leq X_{(h+1)}, \quad h = 1, 2, \cdots, N_X \\ F_X(X_{(1)}) = F_X(0) \end{cases}$$
(8)

经证明(见附录),合理设置边界效益因子 $\beta_i(i \in N_D)$ 的取值后,针对本文中的所有决策变量 $X(X \in X)$, F_X

均具有斜率递增的特点,即满足 A_{X(h}) 《A_{X(h+1)}。

对每个变量 X 引入分段变量 $X_h(h=1,2,\dots,N_X)$, 有 $0 \leq X_h \leq X_{(h+1)} - X_{(h)}$,则 X 可由式 (9) 表征。

$$X = \sum_{h=1}^{N_X} X_h \tag{9}$$

由上述分析可知,在组合系统任一状态 *s*下,式(1)~式(5)所示的输电能力优化决策模型可 被转换为一个关于分段变量的线性规划模型,如式(10)、式(11)所示。

目标函数:

$$J = \min_{X} \sum_{X \in X} \left(F_X(0) + \sum_{h=1}^{N_X} A_{X(h)} X_h \right)$$
(10)

约束条件:

s.t
$$\begin{cases} \boldsymbol{B}_{\mathrm{H1}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{H}} = \boldsymbol{b}_{\mathrm{H1}} \\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{H2}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{H}} \leq \boldsymbol{b}_{\mathrm{H2}} \\ \boldsymbol{X}_{\mathrm{H}}^{\mathrm{Min}} \leq \boldsymbol{X}_{\mathrm{H}} \leq \boldsymbol{X}_{\mathrm{H}}^{\mathrm{Max}} \end{cases}$$
(11)

式中, $X_{\rm H}$ 为决策变量 X 的分段变量列向量,为 $n_{\rm H}$ 维; $B_{\rm H1}$ 、 $B_{\rm H2}$ 分别为对应的系数矩阵; $b_{\rm H1}$ 、 $b_{\rm H2}$ 为 相应的列向量; $X_{\rm H}^{\rm Max}$ 、 $X_{\rm H}^{\rm Min}$ 为 $X_{\rm H}$ 的上、下限列向 量,下限一般取为0。

$$n_{\rm H} = \sum_{X \in \mathcal{X}} N_X \tag{12}$$

由式(12)可知,将优化决策模型转换为关于 分段变量的线性规划模型时,会增加求解变量的个 数,为此,本文基于递增斜率分段线性规划的对偶 算法^[26]对优化模型进行求解。由文献[26]可知,该 方法并不需要直接使用分段变量,不仅可以减少内 存使用量,而且能有效提高计算效率。

关于本文提出的输电能力优化决策模型及分段 线性化的合理性和有效性,将在附录中做进一步的 说明和展示。

2 传输点容量模型及负荷模型

2.1 概率一频率分布函数

2.1.1 增量频率

假设 S_Y 为随机变量 Y的状态集, Y在状态 $j(j \in S_Y)$ 下取值为 Y(j), 且 S_{Yj}^{u} 、 $S_{Yj}^{d}(S_{Yj}^{u},S_{Yj}^{d} \subseteq S_Y)$ 分别表示 $S_Y 中 Y$ 取值大于和小于 Y(j)的状态集。若已知 Y的随 机过程服从马尔科夫链,则在已知 Y 处于不同状态 的概率及不同状态间转移率的情况下,可得到 Y 在 相应状态 j下的增量频率^[18] $f_Y(j)$ 如式 (13)所示。

$$\begin{cases} f_{Y}(j) = \sum_{k \in S_{Y_{j}^{u}}} f_{Yjk} - \sum_{\nu \in S_{Y_{j}^{d}}} f_{Y\nu j} & j \in S_{Y} \\ f_{Yjk} = p_{Y}(j)\lambda_{Yjk} & f_{Y\nu j} = p_{Y}(\nu)\lambda_{Y\nu j} \end{cases}$$
(13)

特别当满足频率平衡条件,即 $f_{Y_{jk}}=f_{Y_{kj}}$ ($\forall j,k \in S_{Y}$)时,式(13)可被简化为

$$f_{Y}(j) = p_{Y}(j) \left(\sum_{k \in S_{Yj}^{u}} \lambda_{Yjk} - \sum_{\nu \in S_{Yj}^{d}} \lambda_{Yj\nu} \right) \qquad j \in S_{Y} \quad (14)$$

2.1.2 概率一频率分布函数的构建与计算

通过对状态概率及增量频率的分析,可得到随 机变量 Y 的概率一频率分布函数为^[19-21]

$$\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{Y}} = \left\{ \boldsymbol{Y}; \quad \boldsymbol{p}_{\boldsymbol{Y}}; \quad \boldsymbol{f}_{\boldsymbol{Y}} \right\}$$
(15)

式中, Y为 $Y(j)(j \in S_Y)$ 按顺序排列的列向量; p_Y 为 Y离散状态对应的概率列向量,亦称为 Y的概率分布 函数; f_Y 为 Y 离散状态对应的增量频率列向量,亦 称为 Y的频率分布函数; Y、 p_Y 以及 f_Y 的各分量一 一对应。

已知随机变量 Y 和 Z的 $M_Y 和 M_Z$, 若 Y 和 Z相 互独立且随机变量 W=Y+Z,则可得到随机变量 W的概率一频率分布函数 M_W 如式(16)所示。

$$\boldsymbol{M}_{W} = \left\{ \boldsymbol{W}; \quad \boldsymbol{p}_{W}; \quad \boldsymbol{f}_{W} \right\}$$
(16)

定义:

$$\boldsymbol{M}_{W} = \boldsymbol{M}_{Y} * \boldsymbol{M}_{Z} \rightarrow \begin{cases} \boldsymbol{p}_{W} = \boldsymbol{p}_{Y} * \boldsymbol{p}_{Z} \\ \boldsymbol{f}_{W} = (\boldsymbol{p}_{Y} * \boldsymbol{f}_{Z}) \oplus (\boldsymbol{p}_{Z} * \boldsymbol{f}_{Y}) \end{cases}$$
(17)

式中, W 为 $W(j)(j \in S_w)$ 按顺序排列的列向量,与 p_w 、 f_w ——对应, S_w 为 W 的状态集; *为卷积算 子; ⊕为函数加法算子,表示函数自变量对应项 相加。

可应用快速傅里叶变换^[20,21]完成式(16)、式(17) 所示的卷积计算,进一步提高计算效率。

若己知随机变量 Y 的 M_Y,则发生 Y<H 的概率 P_Y(Y<H)以及单位时间内发生 Y<H 的次数 F_Y(Y<H) 可分别由式(18)和式(19)计算得到。

$$P_{Y}(Y < H) = \sum_{j \in \{S_{Y} \cap |Y| < H\}} p_{Y}(j)$$
(18)

$$F_{Y}(Y < H) = \sum_{j \in \{S_{Y} \cap Y < H\}} f_{Y}(j)$$
 (19)

离散卷积计算需要确定离散步长。本文在构建 概率一频率分布函数时,依据精度要求,应用舍入 技术^[19],将随机变量非整数倍步长离散值对应的概 率及增量频率折算至相邻的整数倍步长离散值上。 如无特殊说明,下文中的概率一频率分布函数均为 舍入后的离散分布函数。

2.2 传输点容量模型

组合系统任意状态 *s* 的概率可由系统中所有设备的状态概率计算得到^[5,27]。以两状态模型为例,组合系统状态 *s* 的概率如式(20)所示。

$$p(s) = \prod_{q \in Q(s)} P_q \prod_{c \in C(s)} (1 - P_c)$$
(20)

式中, P_q 、 P_c 分别为设备 q 和设备 c 的停运概率。 在组合系统状态 s 下, C(s)为系统中所有正常设备 的集合; Q(s)为系统中所有故障设备的集合。

组合系统中各设备的状态转移过程可视为服从 马尔科夫链。假设组合系统相邻状态间只有一个设 备的状态发生改变^[5,27],以设备两状态模型为例, 则组合系统从状态 *s* 到状态 *k* 的转移率 λ_{sk} 可由相应 设备的故障率或修复率代表,如式(21)所示。

$$\lambda_{sk} = \begin{cases} \lambda_q & q \in C(s) \& q \in Q(k) \\ \mu_q & q \in Q(s) \& q \in C(k) \end{cases}$$
(21)

式中, λ_q 和 μ_q 分别为设备q的故障率和修复率。

由第1节可知, $D_{TCi}(s)(i \in N_D)$ 与组合系统状态 一一对应, $D_{TCi}(s)(i \in N_D)$ 的不同状态间的转移(率) 即为组合系统不同状态间的转移(率)。在组合系统 不同状态s下,均可计算得到相应的 $D_{TCi}(s)(i \in N_D)$, 将其与组合系统状态s发生的概率及组合系统不同 状态间的转移率相结合,应用 2.1 节所述方法(此 时 $Y=D_{TCi}$)即可得到 $D_{TCi}(i \in N_D)$ 的概率一频率分布 函数,亦即传输点容量模型,如式(22)所示。

 $M_{D_{\mathrm{TC}i}} = \left\{ D_{\mathrm{TC}i}; p_{D_{\mathrm{TC}i}}; f_{D_{\mathrm{TC}i}} \right\}$ $i \in N_{\mathrm{D}}$ (22) 2.3 负荷模型

组合系统各传输点的负荷可等效为"负"输电能力。通过聚类分析^[28],可将随机波动的负荷用有限个离散负荷状态近似模拟,若进一步将时序负荷视为状态空间离散而时间参数连续的多状态马尔科夫链^[18,19],则各 $D_{Pi}(i \in N_D)$ 的负荷 L_i 从状态j到状态k的转移率 λ_{Lik} 可由历史统计数据计算得到。

$$\lambda_{L_ijk} = \frac{N_{L_ijk}}{T_{L_ij}} \qquad i \in N_{\rm D} \tag{23}$$

式中, N_{L_ik}为统计期间 L_i从状态 j 到 k 的转移次数; T_{L_i}为统计期间 L_i处于状态 j 的总持续时间。

Li的状态 j 发生的概率可表示为

$$p_{L_{i}}(j) = \frac{T_{L_{i}j}}{\sum_{k \in S_{L_{i}}} T_{L_{i}k}} \qquad i \in N_{\mathrm{D}}$$
(24)

式中, S_{L_i} 为 L_i 的状态集。

本文中, L_i(i∈N_D)取值为 L 的概率密度由式 (25) 计算得到。

$$\varphi_{L_i}(L) = \frac{p_{L_i}(j)}{\Delta L} \quad L_i(j) - \frac{\Delta L}{2} \le L < L_i(j) + \frac{\Delta L}{2} \quad (25)$$

式中, ΔL 为 L_i 的离散步长。

若已知 $L_i(i \in N_D)$ 的各状态概率及不同状态间的转移率,则应用 2.1 节所述方法(此时 $Y=L_i$)就可得到 $L_i(i \in N_D)$ 的概率一频率分布函数,即负荷模型,如式(26)所示。

 $M_{L_{i}} = \{ L_{i}; p_{L_{i}}; f_{L_{i}} \}$ $i \in N_{D}$ (26) 式中, L_{i} 为等效的"负"输电能力列向量。

3 发输电系统可靠性评估

对 $\forall i \in N_D$,利用 $D_{TCi} = L_i$,即可得到 D_{Pi} 的供 电裕度 $R_i = D_{TCi} + L_i$ 。 D_{TCi} 是组合系统自身的属性, 其与 L_i 之间可视为彼此独立,因此 R_i 的概率一频率 分布函数可基于式 (16)、式 (17) 计算得到,如式 (27) 所示。

 $M_{R_i} = M_{D_{\text{TC}i}} * M_{L_i} = \{ R_i; p_{R_i}; f_{R_i} \}, i \in N_{\text{D}} \quad (27)$ 3.1 传输点可靠性指标

由传输点可靠性指标的定义可知, $D_{Pi}(i \in N_D)$ 的电力不足期望值(loss of load expectation of D_{Pi} , I_{LOLEi})实际上就是 D_{Pi} 供电裕度 $R_i < 0$ 的时间, 而 D_{Pi} 的电力不足频率(loss of load frequency of D_{Pi} , I_{LOLFi})即是 D_{Pi} 单位时间内发生 $R_i < 0$ 的次数。因此 由式(18)和式(19)可知, I_{LOLEi} 和 I_{LOLFi} 可分别 由式(28)和式(29)计算得到。

$$I_{\text{LOLE}i} = 8760 P_{R_i} (R_i < 0) \tag{28}$$

$$I_{\text{LOLF}i} = F_{R_i} (R_i < 0)$$
 (29)

此外, $D_{Pi}(i \in N_D)$ 的电力不足持续时间(loss of load duration of D_{Pi} , I_{LOLDi})、电量不足期望值 (expected energy not supplied of D_{Pi} , I_{EENSi})、负荷 削减期望值(expected load curtailments of D_{Pi} , I_{ELCi}) 以及电力不足成本(loss of load cost of D_{Pi} , I_{LOLCi}) 可分别由式(30)~式(33)计算得到。

$$I_{\text{LOLD}i} = \frac{I_{\text{LOLE}i}}{I_{\text{LOLF}i}} \tag{30}$$

$$I_{\text{EENS}i} = 8760 \sum_{j \in \{S_{R_i} \cap R_i < 0\}} -R_i p_{R_i}(j) \quad (31)$$

$$I_{\text{ELC}i} = \frac{I_{\text{EENS}i}}{I_{\text{LOLE}i}} \tag{32}$$

$$I_{\text{LOLC}i} = \begin{cases} \alpha_i I_{\text{EENS}i} & \alpha_i \exists s \texttt{T} \texttt{EENS}i \\ 8760 \sum_{s \in S_{\text{C}}} p(s) \alpha_i(s) E_{\text{C}i}(s) & \alpha_i \exists s \texttt{f} \texttt{F} \end{cases} (33)$$

式中, S_R为 R_i的状态集; S_C为组合系统状态集。

3.2 组合系统可靠性指标

各传输点 $D_{Pi}(i \in N_D)$ 的可靠性指标求出后,组 合系统的电量不足期望值(expected energy not supplied of composite system, I_{EENSc})、负荷削减期 望值(expected load curtailments of composite system, I_{ELCc})、电力不足期望值(loss of load expectation of composite system, I_{LOLEc})以及电力 不足成本(loss of load cost of composite system, I_{LOLCc})可分别由式(34)~式(37)计算得到^[9,11,12]。

$$I_{\text{EENSc}} = \sum_{i \in N_{\text{D}}} I_{\text{EENS}i} \tag{34}$$

$$I_{\text{ELCc}} = \sum_{i \in N_{\text{D}}} I_{\text{ELC}i}$$
(35)

$$I_{\rm LOLEc} = \frac{I_{\rm EENSc}}{I_{\rm ELCc}}$$
(36)

$$I_{\text{LOLCc}} = \sum_{i \in N_{\text{D}}} I_{\text{LOLC}i}$$
(37)

由式(1)、式(33)和式(37)可知,本文输 电能力优化决策模型实质上是以 I_{LOLC}。最小为优化 目标的模型。

4 算例分析

4.1 算例系统基本情况

以 RBTS-6 节点系统^[29]为例,分别应用传统 CMELDC 法^[9]及本文方法进行可靠性评估,验证本 文方法的有效性。RBTS-6 节点系统如图 1 所示, 该系统设备的电气及可靠性参数详见文献[29]。



图 1 中, Bus2~Bus6 分别对应传输点 D_{P1}~D_{P5}, 各传输点的原始负荷峰值 L_{Mi}(*i*∈N_D)如图 1 所示。 在组合系统状态分析中,发电机故障、线路故障以 及线路和发电机同时故障均枚举至 3 阶。分段线性 化过程中, $D_{\text{TC}i}(i \in N_{\text{D}})$ 的分段数取为 20,分段变量 $D_{\text{TC}ih} \in [0, 0.1L_{\text{M}i}](\forall h)$ 。各传输点 $D_{\text{P}i}(i \in N_{\text{D}})$ 削减负 荷的单位损失价值 α_i 的初始取值相同,均取为 α_i =60 \$/MWh $(i \in N_{\text{D}})$ 。应用 CMELDC 法计算组合系统各 状态下传输点的输电能力时,负荷等比例增长向量 取为各传输点的原始负荷峰值向量 $L_{\text{M}}=[L_{\text{M}1}, L_{\text{M}2}, \cdots, L_{\text{M5}}]$ 。分布函数的离散步长统一取为 0.5 MW。

4.2 负荷概率分布影响分析

暂不计频率及持续时间型指标,即此时 $f_{L_i}=0$ 、 $f_{D_{\Gamma Ci}}=0(i \in N_D)$ 。假设 $D_{P1}\sim D_{P5}$ 的负荷均服从正态分 布,并参照正态分布的 $3\sigma(\sigma$ 为负荷标准差)准则, 设各传输点负荷的期望值为其原始负荷峰值的 3/4, 标准差为原始负荷峰值与期望值之差的 1/3,相应 的负荷分布特性见表 1。

表1 负荷正态分布特性

Tab.1 Normal distribution characteristics for loads

of delivery points

负荷特性	$D_{\rm P1}$	$D_{\rm P2}$	$D_{\rm P3}$	$D_{ m P4}$	D_{P5}
期望值 <i>E_i</i> /MW	15	63.75	30	15	15
标准差 σ _i /MW	1.67	7.08	3.33	1.67	1.67

针对以下两种情况进行分析计算:

情况 1: $\alpha_i(i \in N_D)$ 取初始值,各传输点负荷的概率分布服从表 1 所示参数的正态分布,此时各传输 点负荷概率分布参数(期望值、标准差)间的比例 与相应传输点负荷增长向量间的比例相同,即 $E_i/E_{j}=\sigma_i/\sigma_j=L_{Mi}/L_{Mj}(\forall i, j \in N_D)_{\circ}$

情况 2:相比情况 1, D_{Pl} 负荷的标准差变为表 1 所示的 3 倍 (期望值不变),即 $\sigma_l=5$ MW,其他参数保持不变。

分别应用传统 CMELDC 法及本文方法进行计算,得到情况1下的传输点及组合系统可靠性指标 见表2和表3,情况2下计算所得的相应可靠性指标见表4和表5。

由表 2 和表 3 可知,在情况 1 下,应用本文 方法及传统 CMELDC 法计算所得的组合系统可靠 性指标非常接近,部分传输点可靠性指标存在差 异,但差异不大,说明当各传输点的负荷概率分 布参数满足 $E_i/E_j=\sigma_i/\sigma_j=L_{Mi}/L_{Mj}(\forall i, j \in N_D)$ 时,在 $a_i(i \in N_D)$ 取值相同的情况下,本文方法及传统 CMELDC 法均能较好地实现组合系统及其传输点 的可靠性评估。然而,条件 $E_i/E_j=\sigma_i/\sigma_j=L_{Mi}/L_{Mj}$ 是 假设单一负荷分布特性按负荷比例分配至各负荷 点的结果,在实际中通常难以满足,如情况 2 即 不满足上述条件。

表 2 情况 1 传输点指标

Та	b.2	Index of	delivery	points	in case	1
	CN	TEL DC 社			未立士》	+

	CMEEDC 12					
	<i>I</i> _{LOLE<i>i</i>} /(h/年)	I _{EENSi} / (MW·h/年)	I _{LOLCi} /\$	I _{LOLEi} / (h/年)	I _{EENSi} / (MW·h/年)	I _{LOLCi} /\$
$D_{\rm P1}$	2.52	2.5	150.19	3	2.58	154.75
$D_{\rm P2}$	2.63	10.66	639.66	2.38	9.34	560.47
D_{P3}	2.59	4.98	299.01	3.2	6.1	366.05
$D_{\rm P4}$	2.53	2.67	160.34	3.27	2.98	178.72
$D_{\rm P5}$	12.51	152.3	9 138.19	13.04	152.01	9 120.69

表 3 情况 1 组合系统指标

Tab.3 In	Index of composite power system in case1					
方法	ILOLEc/(h/年)	I _{EENSc} /(MW·h/年)	$I_{\rm LOLCc}/\$$			
CMELDC 法	8.57	173.12	10 387.39			
本文方法	8.98	173.01	10 380.67			

表4 情况2传输点指标

Tab.4 Index of delivery points in case2

	CMELDC 法			本文方法		
	I _{LOLEi} /	I _{EENSi} /	T /¢	I _{LOLEi} /	I _{EENSi} /	7 /¢
	(h/年)	(MW·h/年)	ILOLCi/ Ø	(h/年)	(MW·h/年)	ILOLCi/ \$
$D_{\rm P1}$	211.09	445.97	26 758.29	4.26	10.64	638.55
$D_{\rm P2}$	2.63	10.66	639.66	4.3	15.28	916.6
$D_{\rm P3}$	2.59	4.98	299.01	4.19	7.03	421.6
$D_{\rm P4}$	2.53	2.67	160.34	6.82	5.72	343.02
D_{P5}	12.51	152.3	9 138.19	16.81	155.37	9 321.93

表 5 情况 2 组合系统指标

Tab.5 In	Index of composite power system in case 2					
方法	ILOLEc/(h/年)	I _{EENSc} /(MW·h/年)	$I_{\rm LOLCc}/\$$			
CMELDC 法	28.92	616.59	36 995.49			
本文方法	10.89	194.03	11 641.69			

对比表 2 与表 4 以及表 3 与表 5 可知:

1)相比于情况 1 的 CMELDC 法计算结果,在 情况 2 下,当负荷的不确定性发生变化,即 *D*_{P1} 负 荷的标准差增大、不确定性增强时,由 CMELDC 法计算得到的 *D*_{P1} 可靠性指标及组合系统可靠性指 标严重恶化,除 *D*_{P1} 以外的其他传输点的可靠性指 标保持不变。这是因为 CMELDC 法中计算输电能 力时所使用的负荷等比例增长向量固定不变,难以 适应传输点负荷水平不确定性的变化。

2) 在情况 2 下,应用本文方法计算得到的 D_{P1} 及组合系统可靠性指标明显优于 CMELDC 法所得 结果。

3)相比于情况1中本文方法的计算结果,在情况2中应用本文方法得到的组合系统可靠性指标没

有发生较大幅度的劣化,各传输点的可靠性指标虽然也发生了劣化,但劣化程度均较低,体现了风险均摊的特点,这与由传统 CMELDC 法得到的 *D*_{P1} 及组合系统可靠性指标出现严重劣化的情况形成鲜明对比。

可见,本文方法所得结果符合最优负荷削减的 决策期望,也说明本文的输电能力优化决策模型能 计及各传输点负荷水平变化的不确定性,在组合系 统各种状态下可以实现输电能力的合理分配。

4.3 输电网阻塞问题影响分析

在 4.2 节情况 1 的基础上,将算例系统中各传输点的负荷增加为原来的 2 倍,即表 1 中各传输点 负荷的期望值及标准差均变为原来的 2 倍,同时, 为满足功率平衡,各发电机的额定容量亦增加为原 来的 2 倍,而各输电线的有功潮流限值不变。修改 后的算例系统负荷需求较大而输电网资源紧张,网 络阻塞问题较为严重。

依据上述条件,针对以下情况进行分析计算:

情况 3:采用修改后的发电机模型及负荷概率 分布模型,各分段变量 *D*_{TC*ih*}(*i*∈*N*_D)的取值范围亦增 加为初始的两倍,即 *D*_{TC*ih*}∈[0, 0.2*L*_{M*i*}](∀*h*),其余 条件与情况1相同。

分别应用传统 CMELDC 法及本文方法计算得 到的组合系统可靠性指标见表 6。

表 6 情况 3 组合系统指标

Tab.6 Index of composite power system in case3

方法	$I_{\rm LOLEc}/({\rm h}/{\rm fm})$	I _{EENSc} /(MW·h/年)	$I_{\rm LOLCc}/\$$
CMELDC 法	199.63	4 235.74	254 144.18
本文方法	188.53	3 876.3	232 578.2

对比表 3 和表 6 可知,与情况 1 不同,在情况 3 下,应用本文方法及传统 CMELDC 法计算得到的 组合系统可靠性指标不再相似,由前者得到的组合 系统可靠性指标明显优于由后者得到的结果。这说 明在网络阻塞问题较为严重的情况下,即使各传输 点的负荷概率分布参数满足 $E_i/E_j=\sigma_i/\sigma_j=L_{Mi}/L_{Mj}$ ($\forall i$, $j \in N_D$)这样的特殊条件,传统 CMELDC 法仍然可能 存在较大误差,其所得结果偏于保守,而本文方法 的适用性更强,能依据最优负荷削减的决策期望来 合理分配输电能力。

4.4 频率和时间型指标以及优化策略影响分析

计算频率及持续时间型指标时,假设各传输点的时序负荷统计样本为已知,均由测试系统 8 736 个采样点的年小时归一化负荷数据^[29]乘以相应传 输点的负荷峰值得到,而 *D*_{P1}~*D*_{P5} 的负荷峰值分别 取其原始负荷峰值 L_{M1}~L_{M5}(如图 1 中所示)。构建 各传输点负荷模型时,应用质心相似度聚类法^[28] 将历史时序负荷样本划分为 168 个类,即各传输点 负荷具有 168 个状态,各状态持续时间服从指数分 布(即状态转移过程服从马尔科夫链)的假设,在 显著性水平为 0.05 条件下,满足 KS 检验(Kolmogorov-Smirnov test)^[30]。

针对以下两种情况,分别应用传统 CMELDC 法及本文方法进行分析计算:

情况 4: 相比于情况 1, 各传输点负荷取为上述 时序负荷, 其他参数保持不变。

情况 5:相比情况 4, D_{P2} 削减负荷的单位损失价值变为初始值的 3 倍,即 $\alpha_2=180$ \$/(MW·h),其他参数保持不变。

在情况 4 下,得到的包括频率及持续时间型指标在内的传输点及组合系统可靠性指标见表 7 和表 8。情况 5 下的相应可靠性指标见表 9 和表 10。需要指出的是,在传统的 CMELDC 法中并未给出频率及持续时间型指标的计算方法,表 7 与表 9 中对应 CMELDC 法的频率及持续时间型指标是将本文所提概率一频率分布函数法与 CMELDC 法结合后所得的结果。

表 7 情况 4 传输点指标

Tab.7 Index of delivery points in case 4

	CMELDC 法			本文方法		
	$I_{\rm LOLFi}$	$I_{\text{LOLD}i}$	7 /¢	I _{LOLFi} /	$I_{\text{LOLD}i}$	7 /¢
	(次/年)	(h/次)	$I_{\text{LOLC}i}/\$$	(次/年)	(h/次)	$I_{\text{LOLC}i}/\mathfrak{F}$
$D_{\rm P1}$	0.23	4.51	60.97	0.29	4.67	71.5
$D_{\rm P2}$	0.24	4.45	259.32	0.25	4.29	225.87
$D_{\rm P3}$	0.24	4.45	121.14	0.24	4.46	116.73
$D_{\rm P4}$	0.24	4.4	69.27	0.32	4.37	79.4
D_{P5}	3.73	2.96	7 448.51	3.81	2.98	7 446.19

表 8 情况 4 组合系统指标

Tab.8 In	Index of composite power system in case 4					
方法	I _{LOLEc} /(h/年)	IEENSc/(MW·h/年)	$I_{\rm LOLCc}/\$$			
CMELDC 法	6.89	132.65	7 959.21			
本文方法	7.28	132.33	7 939.68			

由表 7 和表 8 可知,在情况 4 下,本文方法与 CMELDC 法计算所得的组合系统可靠性指标非常 接近,部分传输点可靠性指标存在差异,但差异不 大。与对情况 1 结果的分析类似,这是因为各传输 点的 $a_i(i \in N_D)$ 取值相同,且各传输点采用相同的年 小时归一化负荷数据,各传输点负荷的概率分布参 数满足 $E_i/E_j=\sigma_i/\sigma_j=L_{Mi}/L_{Mj}(\forall i, j \in N_D)$ 的特殊条件。

Tab.9 Index of delivery points in case 5							
	CMELDC 法				本文方法		
	I _{LOLFi} / (次/年)	I _{LOLDi} / (h/次)	I _{LOLCi} /\$	I _{LOLFi} / (次/年)	I _{LOLDi} / (h/次)	I _{LOLCi} /\$	
$D_{\rm P1}$	0.23	4.51	60.97	0.46	4.69	128.39	
$D_{\rm P2}$	0.24	4.45	777.97	0.15	3.71	267.18	
$D_{\rm P3}$	0.24	4.45	121.14	0.41	4.45	228.3	
$D_{\rm P4}$	0.24	4.4	69.27	0.46	4.56	138.05	
$D_{\rm P5}$	3.73	2.96	7 448.51	3.95	3.06	7 516.05	
	ᆂᇪᅝᇄᇰᄱᇫᅎᄷᄡᇊ						

表9 情况5传输点指标

Tab.10	Index of	composite	e power sy	stem in	case 5
	表 10	情况 5 组	1合系统指	旨标	
3.73	2.96	7 448.51	3.95	3.06	7 516
0.24	4.4	69.27	0.46	4.56	138.0

方法	$I_{\rm LOLEc}/({\rm h/\mp})$	IEENSc/(MW·h/年)	$I_{\rm LOLCc}/\$$
CMELDC 法	6.89	132.65	8 477.85
本文方法	7.80	135.00	8 277.96

对比表 7 与表 9 以及表 8 与表 10 可知:

1)相比于情况 4 中 CMELDC 法的计算结果, 在情况5下,当D_{P2}削减负荷的单位损失价值增大, 即各传输点的 $\alpha_i(i \in N_D)$ 取值不一致时,在由 CMELDC 法计算得到的传输点及组合系统可靠性 指标中,除 ILOLC2 及 ILOLCc 严重恶化外,其余指标 均保持不变。这是因为 CMELDC 法中计算输电能 力时所使用的负荷增长向量固定不变,当负荷分布 不变时, α2 的增大必然导致所得的 ILOLC2 及 ILOLCe 增加,而其他可靠性指标不会发生改变。

2) 相比于情况 4 中本文方法的计算结果, 在情 况 5 下,应用本文方法计算得到的 DP2 的可靠性指 标中,除 ILOLC2存在轻微劣化外, DP2的其余指标均 得到优化。这是因为本文方法以最优负荷削减为目 标,当 α₂ 增大时,系统各状态下分配给 D_{P2} 的输电 能力将相应地增加, Dp2 的可靠性水平亦随之提高。

3) 相比于情况 4 中本文方法的计算结果, 情况 5 中,应用本文方法得到的除 Dpp 以外的其余传输 点的可靠性指标虽然存在劣化,且 I_{EENSc} 稍有增加 并略大于情况 5 中 CMELDC 法所得的 IEENSc, 但在 情况 5 中本文方法计算得到的 ILOLCc 却明显低于 CMELDC 法计算所得结果,符合最优负荷削减的决 策期望。

4.5 模拟结果对比

以情况 4 为例,分别应用本文方法、传统 CMELDC 法、非序贯蒙特卡洛模拟(Nonsequential Monte-Carlo Simulation, NSMCS)及序贯蒙特卡洛 模拟 (Sequential Monte-Carlo Simulation, SMCS)^[2] 法进行对比分析。由不同方法计算得到的 RBTS-6

节点系统的可靠性指标及相应的运行时间见表 11。 模拟法以 I_{EENSc}的方差系数^[2]ξ_{EENSc}≤0.04 作为收敛 条件。计算环境为 Matlab7.0, Intel(R) Core(TM) i5-4440, CPU为 3.10 GHz, 4 GB内存。

由表 11 可知,本文方法与模拟法的计算结果 非常接近,证明了本文方法的有效性。因本文方 法采用了以最优负荷削减为目标的非线性优化模 型(后被转换为分段线性规划模型进行求解),因 此计算时间相比传统 CMELDC 法有所增加, 但二 者用时相差不大,均较短,且由 4.2~4.4 节的分析 可知,本文方法能更好地符合最优负荷削减的决 策期望,说明相比于传统 CMELDC 法,本文方法 能在保证计算效率的同时, 使得评估结果更加合 理有效。

表 11 不同方法所得结果对比

Tab.10	Comparison	for results	of different	methods
--------	------------	-------------	--------------	---------

	本文方法	CMELDC 法	NSMCS	SMCS
I _{EENSc} /(MW·h/年)	132.33	132.65	127.63	133.35
运行时间/s	4.54	3.88	6 587.46	16 335.32

5 结论

本文在马尔科夫链的基础上,提出一种新的组 合系统可靠性评估方法。算例分析表明:

1)建立的传输点输电能力优化决策模型能计及 组合系统各传输点负荷水平不确定性及最优负荷削 减策略的影响,实现各传输点输电能力的合理分配, 进而保证所得传输点容量模型的有效性。基于本文 方法计算得到的组合系统及其传输点的可靠性评估 结果符合最优负荷削减的决策期望。

2) 基于本文方法, 能实现组合系统与相应负荷 的解耦分析,可靠性指标的计算可由相应概率一频 率分布函数的卷积和加法运算实现,保留了传统 CMELDC 法的优势,计算效率较高。并且,应用本 文方法,不仅能得到组合系及其传输点的概率型可 靠性指标,而且还能得到频率及持续时间型等可靠 性指标,使得组合系统的可靠性评估更加全面。

3)虽然本文建立的输电能力优化决策模型的目 标函数不能代表所有的最优负荷削减策略,但是从 以往可靠性研究中涉及的最优负荷削减目标(函数) 来看,不难理解,通常当 D_{TC} 越小(即可能的负荷 削减越大)时,其对应的优化目标的边界效益越大, 即 D_{TC} 越小, 增加单位 D_{TC} 所获得的收益(如减小 切负荷成本)通常越大,换句话说,即优化目标所 反映的"成本"(与"收益"呈负相关)关于 D_{TC}

101

通常具有斜率递增的特点,因此本文针对递增斜率 的分段线性化方法对不同的最优负荷削减目标(函 数)具有广泛适用性。

4)本文基于解析计算构建的组合系统传输点容 量模型实质上为随机模型。除本文使用的组合系统 状态(概率及转移率)分析方法以外,亦可基于模 拟法构建传输点容量模型,并计入风电等新能源随 机性的影响。本文所建立的传输点容量模型不仅能 直观表征组合系统输电能力的不确定性,还可以作 为等效电源模型为下级电网及全电压等级电网的可 靠性评估提供依据。

附 录

任一组合系统状态 $s \, \mathrm{F}$,对于传输点 $D_{\mathrm{Pi}}(i \in N_{\mathrm{D}})$ 的输 电能力 D_{TCi} (变量),即 $X=D_{\mathrm{TCi}}$,其相应函数 F_{X} 的斜率 A_{X} 如式(A1)所示。

$$A_{D_{\text{TC}i}} = \frac{\mathrm{d}F_{D_{\text{TC}i}}}{\mathrm{d}D_{\text{TC}i}} = \frac{\mathrm{d}C_{1i}}{\mathrm{d}D_{\text{TC}i}} + \frac{\mathrm{d}C_{2i}}{\mathrm{d}D_{\text{TC}i}} \quad i \in N_{\text{D}} \quad (\text{A1})$$

式中

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{l}i}}{\mathrm{d}D_{\mathrm{TC}i}} = -\alpha_{i}(s) \left(\int_{D_{\mathrm{TC}i}}^{+\infty} \varphi_{L_{i}}(y) \mathrm{d}y - \left(D_{\mathrm{TC}i} - D_{\mathrm{TC}i} \right) \varphi_{L_{i}}(y) \right)$$
$$= -\alpha_{i}(s) \int_{D_{\mathrm{TC}i}}^{+\infty} \varphi_{L_{i}}(y) \mathrm{d}y = -\alpha_{i}(s) P_{L_{i}}(y \ge D_{\mathrm{TC}i})$$

$$\frac{\mathrm{d}C_{2i}}{\mathrm{d}D_{\mathrm{TC}i}} = \begin{cases} 0 & D_{\mathrm{TC}i} \leq L_{i\,\mathrm{max}} \\ -\beta_i & D_{\mathrm{TC}i} > L_{i\,\mathrm{max}} \end{cases}$$
(A3)

式中,在组合系统状态 s下, $a_i(s)$ 为一大于 0 的常数; $P_{L_i}(y \ge D_{TCi})$ 为 D_{Pi} 的负荷 L_i 大于等于 D_{TCi} 的概率,是

关于 $D_{\text{TC}i}$ 的减函数,因此 $\frac{\mathrm{d}C_{1i}}{\mathrm{d}D_{\text{TC}i}}$ 是关于 $D_{\text{TC}i}$ 的增函数。

由式(A2)和式(A3)可知

$$A_{D_{\text{TC}i}} = \begin{cases} -\alpha_i(s)P_{L_i}\left(y \ge D_{\text{TC}i}\right) & D_{\text{TC}i} \le L_{i\max} \\ -\beta_i & D_{\text{TC}i} > L_{i\max} \end{cases}$$
(A4)

对于任一传输点 $D_{Pi}(i \in N_D)$,设 L_{imax} 处于 D_{TCi} 的第 h 分段内,即 $D_{TCi(h)} \leq L_{imax} \leq D_{TCi(h+1)}$,而实际分析中, 任一组合系统状态 s 下, D_{TCi} 该分段的斜率可由式(A5) 计算得到。

$$A_{D_{\mathrm{TC}i} - L_{i\max}} = A_{D_{\mathrm{TC}i}(h)} = -\alpha_{i}(s)P_{L_{i}}\left(y \ge D_{\mathrm{TC}i(h)}\right)$$
(A5)

合理设置效益因子 $\beta_i(i \in N_D)$ 的取值, 使其满足

$$-\beta_i \ge A_{D_{\text{TC}i} - L_{i\max}} \Longrightarrow \beta_i \le -A_{D_{\text{TC}i} - L_{i\max}} \quad (A6)$$

由式 (A4) 可知, A_{Drci} 关于 Drci (非严格) 递增。

特别的,为保证实现最优负荷削减的目标,本文中, 组合系统各传输点效益因子 β_i(*i* ∈N_D)统一取值为

$$\beta_{i} = \gamma \min_{j \in N_{\mathrm{D}}} \left(-A_{D_{\mathrm{TC}j} - L_{j\max}} \right) \qquad i \in N_{\mathrm{D}} \qquad (A7)$$

式中, γ为缩减系数, 0<γ<1, 本文取 γ=0.1。

此外,对于发电机出力变量,因为当 $X=G_i(i \in N_G)$ 时 $F_X=0$,则相应函数 F_X 的斜率为 0,亦可视为具有斜率(非严格)递增的特点。

综上所述,针对本文中的所有决策变量 *X*(发电机出力、节点传输容量),*F*_X均具有斜率递增的特点。

以系统只有两个传输点为例,附图1给出了两传输 点输电能力(D_{TC1}, D_{TC2})在取值空间寻优的示意图。





附图 1 中, 折线 I-J-K-M 与 DTC1 及 DTC2 轴所围区域 表示相应组合系统状态下(DTC1,DTC2)的可行域, [A1, A2] 表示等比例负荷增长向量(对应 CMELDC 法的寻优方 向), [-A_{DTC1},-A_{DTC2}](负号仅为与[A1, A2]对应,方便 表述)表示本文优化决策模型的寻优方向。由附图 1 可 知,由于[A1, A2]固定不变,其延长线与可行域的交点即 为 CMELDC 法所得结果,即(DTC1,DTC2)=(a1,a2);然而, [-A_{DTC1},-A_{DTC2}]与对应的(DTC1,DTC2)空间位置(即 DTC1 或 DTC2的不同分段)有关,并由相应传输点负荷的概率 分布 $\varphi_{L_i}(y)$ 及 $\alpha_i(s)$ 决定, $[-A_{D_{TCI}}, -A_{D_{TC2}}]$ 会随着空间位 置的变化而自适应地发生变化,以线段 I-J 沿线上的各点 为例,从 I 到 J 变化的过程中,各点对应的-A_{Drc1} 将逐 渐减小(即A_{Drc1}逐渐增大),一A_{Drc2}将逐渐增大,这 是由 $P_{L_i}(y \ge a_i)(i=1,2)$ 的变化决定的。在点 (a_1,a_2) 处, 由于 $P_{L_1}(y \ge a_1)$ 明显大于 $P_{L_2}(y \ge a_2)$, 若 $\alpha_1(s)=\alpha_2(s)$, 则 $-A_{D_{TC1}}$ 大于 $-A_{D_{TC2}}$,由附图1可知,所得[$-A_{D_{TC1}}$, $-A_{D_{TC2}}$]

与可行域边界(线段 I-J)不垂直,因此基于本文优化决策模型所得的最优点将会移动至(Drc1,Drc2)=(b1,b2)。

参考文献

- Billinton R, Wangdee W. Delivery point reliability indices of a bulk electric system using sequential Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 345-352.
- [2] 赵渊,周家启,刘志宏.大电网可靠性的序贯和非 序贯蒙特卡洛仿真的收敛性分析及比较[J].电工 技术学报,2009,24(11):127-133.
 Zhao Yuan, Zhou Jiaqi, Liu Zhihong. Convergence analysis and comparison of sequential and nonsequential Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 127-133.
- [3] 蒋程,王硕,王宝庆,等.基于拉丁超立方采样的 含风电电力系统的概率可靠性评估[J].电工技术 学报,2016,31(10):193-206.

Jiang Cheng, Wang Shuo, Wang Baoqing, et al. Probabilistic reliability assessment of power system containing wind power based on Latin Hypercube sampling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 193-206.

[4] 王杨,谢开贵,胡博,等.基于时序模拟的离网型
 微网可靠性分析[J].电工技术学报,2016,31(6):
 206-211.

Wang Yang, Xie Kaigui, Hu Bo, et al. Reliability analysis of islanded microgrid based on sequential simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 206-211.

- [5] 赵渊,周家启,周念成,等.大电力系统可靠性评估的解析计算模型[J].中国电机工程学报,2006,26(5):19-25.
 Zhao Yuan, Zhou Jiaqi, Zhou Niancheng, et al. An analytical approach for bulk power systems reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5):19-25.
- [6] Billinton R, Wang P, Zhang W. Reliability assessment of an electric power system using a reliability network equivalent approach[C]// WESCANEX 97: IEEE Communications, Power and Computing, Conference, 1997, 17(3): 53-58.
- [7] Wang P, Billinton R, Goel L. Unreliability cost

assessment of an electric power system using reliability network equivalent approaches[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 549-556.

- [8] Choi J, Billinton R, Futuhi-Firuzabed M. Development of a nodal effective load model considering transmission system element unavailabilities[J]. IEE Proceedings -Generation Transmission and Distribution, 2005, 152(1): 79-89.
- [9] Choi J, Mount T D, Thomas R J, Billinton R. Probabilistic reliability criterion for planning transmission system expansions[J]. IEE Proceedings -Generation Transmission and Distribution, 2006, 153(6): 719-727.
- [10] Choi J, Tran T, Kwon J, et al. Nodal probabilistic production cost simulation considering transmission system unavailabilty[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2008, 2(1): 32-42.
- [11] Cho K, Park J, Oh T, Choi J, et al. Probabilistic reliability criterion for expansion planning of grids including wind turbine generators[C]//Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011,19(5): 1-6.
- [12] Cho K, Park J, Choi J. Probabilistic reliability based grid expansion planning of power system including wind turbine generators[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2012, 7(5): 698-704.
- [13] 赵渊,张进,芦晶晶,等.大电网可靠性评估的卷积计算模型[J].电网技术,2013,37(9):2466-2473.
 Zhao Yuan, Zhang Jin, Lu Jingjing, et al. A convolution model for bulk power grid reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2466-2473.
- [14] 谈天夫,高山,李海峰,等.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[J].电力 自动化设备,2014,34(12):44-51.
 Tan Tianfu, Gao Shan, Li Haifeng, et al. Improved composite power system equivalent load duration curve method considering variation of load distribution [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 44-51.
- [15] 刘洋,周家启.大电网可靠性评估最优负荷削减模型[J].重庆大学学报:自然科学版,2003,26(10):52-55.

Liu Yang, Zhou Jiaqi. Optimal load curtailment in

bulk power system reliability evaluation[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(10): 52-55.

- Billinton R, Goel L. Overall adequacy assessment of an electric power system[J]. IEE Proceedings C -Generation Transmission and Distribution, 1992, 139(1): 57-63.
- [17] Billinton R, Satish J. Adequacy evaluation in generation, transmission and distribution systems of an electric power system[C]//WESCANEX 93 'Communications, Computers and Power in the Modern Environment.' Conference Proceedings, IEEE, Saskatoon, Sask, Canada, 1993: 120-126.
- [18] Wang X F, Pottle C. A concise frequency and duration approach to generating system reliability studies[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(8): 2521-2530.
- [19] Leite da Silva A M, Melo A C G, Cunha S H F. Frequency and duration method for reliability evaluation of large-scale hydrothermal generating systems[J]. IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, 1991, 138(1): 94-102.
- [20] Renuga P, Ramaraj N, Primrose A. Frequency and duration method for reliability evaluation of large scale power generation system by fast fourier transform technique[J]. Journal of Energy and Environment, 2006, 5: 94-100.
- [21] Leite da Silva A M, Fernández R A G, Singh C. Generating capacity reliability evaluation based on Monte Carlo simulation and cross-entropy methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 129-137.
- [22] Grijalva S, Sauer P W, Weber J D. Enhancement of linear ATC calculations by the incorporation of reactive power flows[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 619-624.
- [23] Bertsekas D P. Nonlinear Programming[M]. 2nd ed. Belmont, MA: Athena Scientific Press, 1999.
- [24] 李士勇. 智能优化算法原理与应用[M]. 哈尔滨:

哈尔滨工业大学出版社, 2012.

- [25] 李志平,李文沅,徐国禹. 具有递增斜率的分段线 性规划的解法. 重庆大学学报, 1989, 12(5): 35-42.
 Li Zhiping, Li Wenyuan, Xu Guoyu. An algorithm of piecewise linear programming with successively increasing slopes[J]. Journal of Chongqing University, 1989, 12(5): 35-42.
- [26] 李文沅,李志平,徐国禹.递增斜率分段线性规划的对偶算法[J].重庆大学学报,1991,14(1):6-11.
 Li Wenyuan, Li Zhiping, Xu Guoyu. A dual algorithm of piecewise linear programming with successively increasing slopes[J]. Journal of Chongqing University, 1991, 14(1): 6-11.
- [27] Billinton R, Allan R N. Reliability evaluation of power systems[M]. 2nd ed. New York: Plenum, 1996.
- [28] 谷云东,张素杰,冯君淑.大用户电力负荷的多模型模糊综合预测[J].电工技术学报,2015,30(23):110-115.
 Gu Yundong, Zhang Sujie, Feng Junshu. Multi-model fuzzy synthesis forecasting of electric power loads for larger consumers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 110-115.
- [29] 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.
- [30] 吴喜之,赵博娟. 非参数统计[M]. 2 版. 北京:中国统计出版社, 2009.

作者简介

祝锦舟 男,1991 年生,博士研究生,研究方向为电网规划及电力系统可靠性。

E-mail: jzzhu2014@sina.com(通信作者)

张 焰 女,1958 年生,教授,博士生导师,研究方向为电力系统规划及电力系统可靠性。

E-mail: zhang_yan@sjtu.edu.cn

(编辑 赫蕾)