

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201162

输电系统风险评估中的分层分级负荷削减模型

张侃君¹, 王作维¹, 杜镇安¹, 黎恒焯¹, 杨惠源², 唐爱红²

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

摘要: 负荷削减计算是输电系统风险评估中的关键步骤。为解决目前负荷削减模型还存在的没有考虑无功潮流和节点电压约束、无法考虑负荷类型削减优先级对风险指标的影响等不足, 提出了一种分层分级最优负荷削减模型。按负荷类型重要度从高到低依次分层削减负荷, 兼顾就近和最优原则, 将参与负荷削减的节点限制在一定分级范围内, 减小计算规模。IEEE-RTS6 算例表明, 所提出的模型在保证准确性的前提下, 相比传统方法能够极大减少重要负荷的削减次数和电力不足期望, 更符合系统实际运行要求, 并一定程度上减少计算时间。

关键词: 风险评估; 负荷重要度; 分层分级原则; 最优原则

Hierarchical load shedding model for transmission system risk assessment

ZHANG Kanjun¹, WANG Zuwei¹, DU Zhen'an¹, LI Hengxuan¹, YANG Huiyuan², TANG Aihong²

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Load shedding calculation is a key step in transmission system risk assessment. To overcome the shortcomings of the current load shedding model, such as its ignorance of reactive power flow and node voltage constraints, and the ignorance of the impact of load shedding priority on the reliability index, a hierarchical optimal load shedding model is proposed. Load is hierarchically cut from high to low according to the load shedding priority, and the principle of proximity and optimization is taken into account. The nodes participating in the optimal load shedding calculation are limited within a certain range to reduce the calculation scale. The IEEE-RTS6 example shows that the proposed model could greatly reduce the operation times and power shortage expectations of important loads compared with the traditional method under the premise of ensuring accuracy. This is more in line with the actual system requirements, and to some extent reduces the calculation time.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of the State Grid Corporation of China (No. 5500-202022072A-0-0-00).

Key words: reliability assessment; load shedding priority; hierarchical load shedding model; optimization principle

0 引言

输电系统作为电力系统的主要组成部分, 对电力系统安全稳定运行有着至关重要的作用, 因此输电系统的风险评估在电力系统规划决策中有着重要作用^[1-9]。负荷削减量通常被视为量化输电系统风险的重要评价指标, 有必要对输电系统风险评估中的负荷削减模型展开研究。

输电系统的风险评估通常由系统状态选择、系

统状态分析、越限校正和风险指标计算等主要步骤组成^[10-11]。越限校正包括为消除系统异常运行状态而采取的负荷削减等措施^[12-15]。目前负荷削减计算通常采用以削减量最小为目标的最优负荷削减法或以距故障点远近为依据的就近负荷削减法。因切负荷量的计算涉及到非线性方程组求解, 为提高算法效率, 通常采用基于直流潮流的线性规划法计算负荷削减量^[16-18], 但忽视了无功功率和电压约束的影响, 与实际情况存在差距。为克服上述不足, 一些研究基于交流潮流法进行负荷削减计算, 并通过控制计算规模来提高计算速度, 文献[19]提出一种基于网流模型的负荷缺供量计算方法, 在精度允许条

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助 (5500-202022072A-0-0-00)

件下极大地缩减了计算时间,但该方法以网流代替潮流,不满足基尔霍夫第二定律,计算结果偏于乐观。文献[20]提出了一种启发式就近负荷削减模型,按照就近原则在失效元件附近一定区域内通过潮流跟踪确定负荷削减集,在减少计算量的同时提高了计算速度,但在负荷削减集内采用了按比例负荷削减方法,未计及负荷的重要程度。文献[21]计及了负荷的重要程度对负荷削减策略的影响,并以高失效率元件为中心将输电系统划分为若干子区域,在子区域内进行最优负荷削减计算,但该模型在子系统划分时存在一定主观性。

随着电网自动化和信息化程度的提高,工程中负荷削减策略由传统的最优负荷削减、就近负荷削减策略逐步向区分负荷性质和重要度的精准切负荷方向发展^[22],其特点就是能够依据负荷性质、重要度等特点,分级依次准确切除负荷,同时兼顾系统负荷削减量最小。而目前相关研究中采用的基于传统直流/交流潮流、以负荷削减量最小为求解目标的最优潮流模型不能满足电网的发展需要。因此,本文提出了一种输电系统风险评估中的分层分级负荷削减模型,模型实现步骤为:失效发生后通过连通性识别判断孤岛,划分原输电系统为若干独立的子网并调整子网的功率平衡;基于交流潮流判别过载线路,依据节点负荷类型及距过载线路的远近,分层分级依次进行负荷削减量计算。通过 IEEE-RTS6 系统^[23]验证算法的有效性,并通过与基于直流潮流和交流潮流的传统最优负荷削减模型比较分析,证明了本文所提模型的优越性。

1 分层分级负荷削减模型的基本概念

传统电网风险评估中的最优切负荷模型,在越限校正时每次都需要在全部节点间进行一次非线性最优规划计算,当节点数量巨大时会导致维数灾难。因此本文对发生支路潮流越限电网中的节点进行分级,将越限校正计算限制在有限范围内,节点分级概念解释如下:

假设电网中某元件因故障退出运行,则此时原输电系统解裂成为 m 个 ($m \geq 1$) 独立的子系统,分别记为 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_m$, 每个子系统之间不存在电气耦合关系,相互独立。

在子系统 N_i ($i \in 1, 2, 3, \dots, m$) 中,将过载输电线路的送端节点记为 S_0 、受端节点记为 T_0 (潮流方向由 S_0 指向 T_0), 并分别称 S_0 和 T_0 为 0 级送端节点和 0 级受端节点。则各过载输电线路将子系统 N_i 分成了送端域 S 和受端域 T , 如图 1 所示。

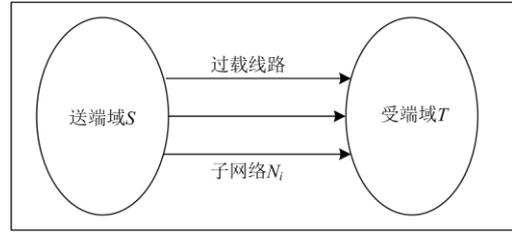


图 1 子系统 N_i 过载线路集

Fig. 1 Overload transmission lines of subsystem N_i

在子系统 N_i 中,与 S_0 和 T_0 有直接线路连接的节点分别称为 1 级送端节点和 1 级受端节点。同理,与 $n-1$ 级送端节点和 $n-1$ 级受端节点直接相连的节点分别称为 n 级送端节点 S_n 和 n 级受端节点 T_n 。例如图 2 中,对于过载线路 $i-j$, 其各级送端节点和受端节点分别可表示为: $S_0 = \{i\}$, $S_1 = \{3\}$, $S_2 = \{1, 2\}$, $T_0 = \{j\}$, $T_1 = \{4\}$, $T_2 = \{5, 6\}$ 。

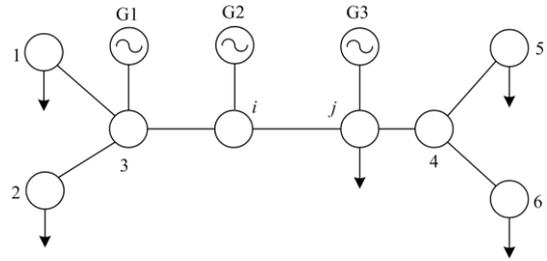


图 2 过载线路 n 级送(受)端节点示意图

Fig. 2 Diagram of n -stage feed (receive) nodes of the overload transmission line

在上述节点分级的基础上,按类型或重要度再对各节点负荷进行分层。本文按重要度从高到低将电网的第一、二、三类负荷分为一、二、三层依次切除,如图 2 所示的系统中,直接与 n 级送(受)端节点相连的电源称为 n 级送(受)端电源,记为 $S_{Gn} (T_{Gn})$, 直接与 n 级送(受)端节点相连的负荷称为 n 级送(受)端负荷,记为 $S_{LDn} (T_{LDn})$, 现将送端域 S 和受端域 T 各节点的第一、二和三类负荷分别记为 S_{LDn-1} 、 S_{LDn-2} 、 $S_{LDn-3} (T_{LDn-1}$ 、 T_{LDn-2} 、 $T_{LDn-3})$ 。

2 分层分级负荷削减模型及实现步骤

2.1 基于交流潮流的传统负荷削减最优化模型

基于交流潮流的传统负荷削减最优化模型的目标是负荷削减量最小,即最优化目标函数为

$$\min \sum_{i \in ND} C_i \quad (1)$$

约束条件为

$$P_i(V, \delta) - P_{LDi} + C_i = 0 \quad i \in ND \quad (2)$$

$$Q_i(V, \delta) - Q_{LDi} = 0 \quad i \in ND \quad (3)$$

$$PG_i^{\min} \leq P_i(V, \delta) \leq PG_i^{\max} \quad i \in NG \quad (4)$$

$$QG_i^{\min} \leq Q_i(V, \delta) \leq QG_i^{\max} \quad i \in NG \quad (5)$$

$$0 \leq C_i \leq P_{LDi} \quad i \in ND \quad (6)$$

$$TR_k(V, \delta) \leq TR_k^{\max} \quad (k \in L) \quad (7)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (i \in N) \quad (8)$$

式中： $P_i(V, \delta) = V_i \sum V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$ ； $Q_i(V, \delta) = V_i \sum V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$ ； G_{ij} 和 B_{ij} 代表导纳矩阵第*i*行第*j*列的实部及虚部； V 是节点母线电压的幅值； δ_{ij} 是线路两端相角差； C_i 是节点*i*的负荷削减量； P_{LDi} 为节点*i*上的有功负荷； Q_{LDi} 为节点*i*上的无功负荷； PG_i^{\max} 、 PG_i^{\min} 、 QG_i^{\max} 和 QG_i^{\min} 分别是发电机节点*i*上的注入有功和注入无功的上下限； TR_k 是输电线路*k*的实际传输容量； TR_k^{\max} 是输电线路*k*的最大传输容量； V_i^{\max} 和 V_i^{\min} 分别是节点*i*母线电压幅值的上下限； ND 、 NG 、 N 和 L 分别为输电系统中负荷母线节点、发电机母线节点、全部母线节点和全部输电线路的集合。

求解目标函数式(1)及约束条件式(2)一式(8)所构成优化模型的解，即为系统中每条母线上的负荷削减量。

2.2 分层分级负荷削减模型

本文提出一种分层分级负荷削减模型，该模型综合节点分级、负荷分层思想对传统模型进行改进，即：分层思想体现为越限线路*k*的受端域*T*中，按照三类负荷、二类负荷、一类负荷的顺序分层依次削减负荷；分级思想体现为将参与负荷削减计算的节点限制在前*n*级中(*n*的具体值需结合过载线路过载容量及受端域负荷容量判定)。其目标函数为

$$\begin{aligned} & \text{if} \quad 0 < \Delta TR_{k^*} < \sum_{i \in ND_{3-n}} C_i \\ & \text{then} \quad \min \sum_{i \in ND_{3-n}} C_i \\ & \text{if} \quad 0 < \Delta TR_{k^*} - \sum_{i \in ND_3} C_i < \sum_{j \in ND_{2-n}} C_j \\ & \text{then} \quad \sum_{i \in ND_3} C_i + \min \sum_{j \in ND_{2-n}} C_j \\ & \text{if} \quad 0 < \Delta TR_{k^*} - \sum_{i \in ND_3} C_i - \sum_{j \in ND_2} C_j < \sum_{k \in ND_{1-n}} C_k \\ & \text{then} \quad \sum_{i \in ND_3} C_i + \sum_{j \in ND_2} C_j + \min \sum_{k \in ND_{1-n}} C_k \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$\Delta TR_{k^*} = TR_{k^*} - TR_k^{\max} \quad (10)$$

约束条件为

$$P_i(V, \delta) - P_{LDi} + \sum_{i \in ND} (C_{i-1} + C_{i-2} + C_{i-3}) = 0 \quad (11)$$

$$Q_i(V, \delta) - Q_{LDi} = 0 \quad i \in ND \quad (12)$$

$$PG_i^{\min} \leq P_i(V, \delta) \leq PG_i^{\max} \quad i \in NG \quad (13)$$

$$QG_i^{\min} \leq Q_i(V, \delta) \leq QG_i^{\max} \quad i \in NG \quad (14)$$

$$0 \leq \sum_{i \in ND} (C_{i-1} + C_{i-2} + C_{i-3}) \leq P_{LDi} \quad i \in ND \quad (15)$$

$$TR_k(V, \delta) \leq TR_k^{\max} \quad k \in L \quad (16)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in N \quad (17)$$

式中： ΔTR_{k^*} 表示输电线路*k*的越限容量(MW)； C_{i-1} 、 C_{i-2} 和 C_{i-3} 分别表示节点*i*上第一、二、三类负荷削减量； ND_{1-n} 、 ND_{2-n} 和 ND_{3-n} 分别表示过载线路*k*所对应的受端域*T*中第一、二、三类负荷节点的前*n*级负荷节点，式中其他变量定义与式(2)一式(8)中相同。

2.3 分层分级负荷削减模型实现步骤

首先进行失效事件后系统状态判别和功率平衡调整：对故障后的输电系统进行连通性识别，原输电系统解裂成为*m*个独立的子系统($m \geq 1$)，则子系统可能存在以下几种情况：①子系统中只有发电机节点而没有负荷节点，则该子系统损失全部发电机出力，但不存在负荷削减的情况；②子系统中只有负荷节点但没有发电机节点，则该子系统损失全部负荷；③子系统中只有唯一的发电机节点，同时负荷也在该发电机节点上，若发电机的最大出力 P_{\max} 大于负荷需求 P_{LD} ，则系统不存在负荷削减情况，否则应按照三、二、一类负荷的顺序依次切除负荷，直至该发电机母线*i*满足 $P_{LD} - C_{i-3} - C_{i-2} - C_{i-1} \leq P_{\max}$ ；④子系统中既有发电机节点也有负荷节点，且该节点不是子系统唯一节点，则应进行如下判断：

若失效事件发生时子系统中所有发电机出力之和 $\sum_{i \in NG} P_i$ 大于子系统的负荷总需求 $\sum_{i \in ND} P_{LDi}$ ，则判断是否满足 $\sum_{i \in NG} P_i - P_{\text{slack-max}} < \sum_{i \in ND} P_{LDi}$ ，式中 $P_{\text{slack-max}}$ 表示子系统中平衡节点的最大出力，若满足则进行潮流越限计算；若不满足则计算 $\sum_{i \in NG} P_i - P_{\text{slack-max}} - \sum_{i \in ND} P_{LDi}$ ，并将该差值按比例分配在子系统的的所有发电机节点上减少发电机出力，并进行潮流越限计算。

若失效事件发生时子系统中所有发电机出力之和 $\sum_{i \in NG} P_i$ 小于子系统的负荷总需求 $\sum_{i \in ND} P_{LDi}$ ，则判断子系统中发电机的备用容量 $\sum_{i \in NG} P_{\text{backup}}$ 是否大于负荷总需求与当前所有发电机出力之和的差值

$\sum_{i \in ND} P_{LDi} - \sum_{i \in NG} P_i$ ，若成立则将该差值按照比例分配至所有具备足够备用容量的发电机节点上。否则，应在子系统内按照三、二、一类负荷的顺序依次削减负荷，若三类负荷总量大于 $\sum_{i \in ND} P_{LDi} - \sum_{i \in NG} P_i - \sum_{i \in NG} P_{\text{backup}}$ ，则将该差值在子系统所有三类负荷节点上按比例削减，并进行潮流越限计算。若三类负荷总量小于 $\sum_{i \in ND} P_{LDi} - \sum_{i \in NG} P_i - \sum_{i \in NG} P_{\text{backup}}$ ，则首先切除全部三类负荷，然后将 $\sum_{i \in ND} P_{LDi} - \sum_{i \in NG} P_i - \sum_{i \in NG} P_{\text{backup}} - \sum_{i \in ND} C_{i-3}$ 按比例分配至所有二类负荷节点上，以此类推，直至子系统削减的负荷总量大于 $\sum_{i \in ND} P_{LDi} - \sum_{i \in NG} P_i - \sum_{i \in NG} P_{\text{backup}}$ ，并进行潮流越限计算。

然后对每个子系统进行基于交流潮流的越限计算，若子系统中所有输电线路不过载且母线电压均在合理值范围内，则不进行负荷削减，否则按过载程度从高到低依次判断过载线路 k 的受端域 T 中，第三类负荷前 n 级的负荷总量是否大于该过载线路的过载容量，即 $\sum_{i \in ND_{3-n}} P_{LDi} > \Delta TR_{k*}$ ，若成立，则只

在子系统前 n 级第三类负荷节点以及发电机节点范围内依照式(9)一式(17)进行最优负荷削减，否则首先切除过载线路 k 的受端域 T 中全部第三类负荷，再判断第二类负荷前 n 级的负荷总量是否大于越限容量与第三类负荷的差值，也就是 $\sum_{i \in ND_{2-n}} P_{LDi} <$

$\Delta TR_{k*} - \sum_{i \in ND_{3-n}} P_{LDi}$ ，若成立，则只在子系统的前 n 级

第二类负荷节点与发电机节点范围内依照式(9)一式(17)进行最优负荷削减，第一类负荷以此类推。

最后统计输电系统的负荷削减量，计算风险指标，算法结束。

3 算例分析

本文基于 Matlab 编写了基于分层分级负荷削减模型的输电系统风险分析程序，并对 IEEE-RTS6 系统的风险指标进行了计算分析。如图 3 所示，IEEE-RTS6 系统共有 6 个节点，9 条输电线路，系统总装机容量为 240 MW，负荷总量为 185 MW。为方便对本文提出的模型进行分析，假设每条母线上的所有负荷类型是相同的，且 BUS 2 和 BUS 3 为一类负荷，BUS 4 为二类负荷，BUS 5 和 BUS 6 为三类负荷。本文在对 IEEE-RTS6 系统进行风险指

标计算时，采用枚举法作为系统状态的选择方法，由于本文主要关注输电系统的风险，因此发电机按 100% 可靠处理，只考虑线路断路故障退出运行的情况，故障阶数考虑至 2 阶，最优潮流求解时使用内点法。风险指标为测试系统中各负荷点的电力不足期望 EDNS(Expected Demand Not Supplied)和各负荷点的负荷削减操作次数。同时，本文分别对基于直流潮流的最优负荷削减模型和基于交流潮流的传统最优负荷削减模型的系统风险指标进行了计算，结果如表 1 所示。

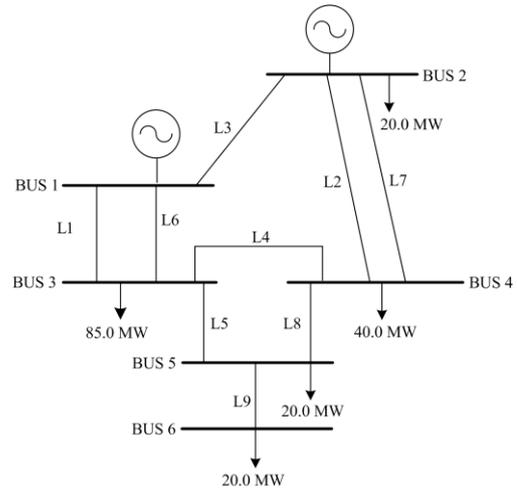


图 3 IEEE-RTS6 系统示意图

Fig. 3 Diagram of the IEEE-RTS6 system

由表 1 可知，采用基于交流潮流的传统最优负荷削减模型负荷削减总量为 986.417 MW，基于本文提出的分层最优负荷削减模型负荷削减总量略高于基于交流潮流的传统最优负荷削减模型，为 1 022.407 MW，造成这种差异的主要原因是本文提出的方法顾及了负荷的重要程度，采取了分层的负荷削减策略，在相同失效条件下，传统最优负荷削减模型优先切除距离过载线路近的一、二类负荷就可保证系统回到安全运行状态，而本文提出的模型需首先切除三类负荷，再对一、二类负荷进行最优负荷削减操作，基于直流潮流的最优负荷削减模型负荷削减总量为 959.727 MW，造成结果偏小的原因是该方法未顾及无功潮流和节点电压的约束，计算结果偏于乐观；在保证负荷削减总量总体相差不是很大(增加 3.45% 负荷削减量)的情况下，本文提出的负荷削减模型能够极大地减少削减一类负荷(BUS 2+BUS 3)的操作次数和电力不足期望，相比传统交流最优负荷削减模型，上述指标按比例分别减少 88.9% 和 99.7%。二类负荷(BUS 4)削减操作次数虽然有所增加，但电力不足期望反而却减少，表明

表 1 不同负荷削减模型下的 IEEE-RTS6 系统风险指标

Table 1 Risk indicators of the IEEE-RTS6 system under different load shedding models

| | | BUS 2 | BUS 3 | BUS 4 | BUS 5 | BUS 6 |
|----------------------|-------------|-------|---------|-----------|---------|---------|
| 基于交流潮流传统 最优负荷削减模型 | EDNS/(MW/年) | 0 | 0.012 8 | 0.007 3 | 0.007 3 | 0.168 2 |
| | 操作次数 | 0 | 18 | 2 | 12 | 30 |
| | 总削减负荷量/MW | | | 986.417 | | |
| | 计算时间/s | | | 44.722 | | |
| 基于直流潮流最优 负荷削减模型 | EDNS/(MW/年) | 0 | 0.044 1 | 0 | 3.09e-4 | 0.060 7 |
| | 操作次数 | 0 | 22 | 0 | 2 | 23 |
| | 总削减负荷量/MW | | | 959.727 | | |
| | 计算时间/s | | | 21.919 | | |
| 基于分层最优 负荷削减模型 | EDNS/(MW/年) | 0 | 3.79e-5 | 0.006 6 | 0.017 8 | 0.169 7 |
| | 操作次数 | 0 | 2 | 10 | 20 | 36 |
| | 总削减负荷量/MW | | | 1 022.407 | | |
| | 计算时间/s | | | 32.475 | | |

按照本文的模型每次切除少量二类负荷即可满足系统安全运行的要求,三类负荷(BUS 4+BUS 5)的削减操作次数和电力不足期望相比传统交流最优负荷削减模型分别增加了 33.3%和 6.8%,体现了本文优先切除重要程度较低负荷的思想,更符合电网切负荷策略的发展方向。三种模型中,基于直流的最优负荷削减模型计算时间最少,主要原因是基于直流潮流的最优负荷削减模型求解本质上是一个线性规划问题,求解速度最快,本文提出的分层最优负荷削减模型耗时相比基于交流潮流的传统最优负荷削减模型耗时少,算法速度提高了 27.4%,主要原因是本文的方法通过分级思想,将最优负荷削减模型中参与负荷削减的节点限制在一定范围内,减少了模型中负荷节点矩阵的维数,增加了计算速度。

4 结论

输电系统风险评估中负荷削减模型与风险指标计算结果的准确度和计算效率密切相关。本文提出了一种输电系统风险评估中的分层分级负荷削减模型,并与基于交流潮流的传统最优负荷削减模型和与基于直流潮流的最优负荷削减模型进行了对比分析。IEEE-RTS6 系统计算表明:(1)本文提出的模型能够计及负荷重要程度,分层依次切除系统中的负荷,极大减少了第一类负荷的操作次数和电力不足期望;(2)在保证精度的前提下,本文提出的模型限制了参与负荷削减的节点数量,计算速度较快。本文提出的分层分级负荷削减模型为输电系统风险评估计算提供了一种新的思路和方法。

参考文献

[1] 谢仕炜, 胡志坚, 宁月. 考虑最优负荷削减方向的电网多目标分层随机机会约束规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 35-42, 51.

XIE Shiwei, HU Zhijian, NING Yue. Multi-objective hierarchical stochastic chance-constrained programming considering optimal load-shedding direction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 35-42, 51.

[2] 刘明顺, 赵立进, 黄良, 等. 基于模糊综合评价的电网风险评估分级[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2017, 50(5): 733-737, 800.

LIU Mingshun, ZHAO Lijin, HUANG Liang, et al. Power grid risks assessment and classification based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(5): 733-737, 800.

[3] YUAN Qiheng, ZHOU Keliang, YAO Jing. A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems[J]. Renewable Energy, 2020, 150: 538-549.

[4] 刘文霞, 李征洲. 北美可靠性风险评价指标及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 180-187.

LIU Wenxia, LI Zhengzhou. North American reliability risk assessment indicators and application analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 180-187.

[5] 李兆伟, 刘福锁, 崔晓丹, 等. 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 35-40.

LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.

[6] 孙元章, 程林, 何剑, 等. 电力系统运行可靠性理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[7] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9, 7.

SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Analysis of key factors of new energy consumption and research on solutions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,

- 37(1): 1-9, 7.
- [8] 金尧, 王瑜, 胡庆虎. 考虑间歇性能源的发输电系统风险评估[J]. 电气技术, 2017(5): 68-70, 73.
JIN Yao, WANG Yu, HU Qinghu. Risk assessment of power generation and transmission system considering intermittent energy[J]. Electrical Engineering, 2017(5): 68-70, 73.
- [9] 刘睿琼, 贾燕冰, 何海丹. 基于输电系统脆弱性的连锁故障风险评估[J]. 太原理工大学学报, 2016, 47(3): 367-372.
LIU Ruiqiong, JIA Yanbing, HE Haidan. Risk assessment of cascading failure based on the fragility of transmission system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(3): 367-372.
- [10] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
- [11] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513, 681.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Research on analysis methods and improvement measures of distribution network resilience under extreme weather conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- [12] KABIR M A, CHOWDHURY A H, NAHID A M. A dynamic-adaptive load shedding methodology to improve frequency resilience of power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122.
- [13] 刘海涛, 肖留江, 牛健, 等. 一种基于 GOOSE 通信的过负荷并切方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 139-144.
LIU Haitao, XIAO Liujiang, NIU Jian, et al. Overloading and cutting method based on GOOSE communication[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 139-144.
- [14] 王韶, 董光德, 晏健. 基于最优负荷削减的小世界电网连锁故障模拟[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 152-156.
WANG Shao, DONG Guangde, YAN Jian. Optimal load-shedding based simulation of cascading failure in small-world power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 152-156.
- [15] 武鹏, 程浩忠, 屈刚. 电网规划中区间最小切负荷量的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 41-46.
WU Peng, CHENG Haozhong, QU Gang. Calculation method of interval minimum load shedding in power grid planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 41-46.
- [16] 焦建林, 元一平, 赵渊, 等. 电网可靠性评估的反向等量配对负荷削减模型[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(4): 43-53.
JIAO Jianlin, YUAN Yiping, ZHAO Yuan, et al. A reverse equivalent pairing load shedding model for assessing power system reliability[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(4): 43-53.
- [17] 元一平. 基于改进负荷削减与序贯链条抽样的电网可靠性评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
YUAN Yiping. Research on reliability evaluation of power system based on improved load curtailment and sequential chain-sampling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [18] 赵渊, 周家启, 谢开贵. 基于网流规划的发输电组合系统可靠性评估模型研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 21-24.
ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, XIE Kaigui. Study on reliability assessment model of composite generation and transmission system based on network flow programming[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 21-24.
- [19] 赵渊, 周家启, 周念成, 等. 发输电系统可靠性评估的启发式就近负荷削减模型[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 34-39.
ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, ZHOU Niancheng, et al. A heuristic approach to local load shedding scheme for reliability assessment of composite generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 34-39.
- [20] 荣雅君, 马秀蕊, 杨伟. 发输电系统可靠性分析中最优切负荷模型[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(7): 58-62.
RONG Yajun, MA Xiurui, YANG Wei. Model of optimal load shedding program for reliability assessment of composite generation and transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(7): 58-62.
- [21] 雷宇骁, 李更丰, 黄玉雄, 等. 基于支持向量机的发/输电系统快速蒙特卡洛可靠性评估方法[J]. 电信科学, 2019, 35(6): 15-24.
LEI Yuxiao, LI Gengfeng, HUANG Yuxiong, et al. Support vector machine based fast Monte Carlo reliability evaluation method for composite power system[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(6): 15-24.
- [22] 史军, 王加澍, 熊峰, 等. 基于智能负载的微电网精准切负荷控制策略[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 103-109.
SHI Jun, WANG Jiashu, XIONG Feng, et al. Precise load shedding control strategy for microgrid based on smart load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 103-109.
- [23] BILLINTON R, KUMAR S. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-10-29

作者简介:

张侃君(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护与自动控制的研究和生产工作。E-mail: 157789779@qq.com

(编辑 张爱琴)