

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191133

考虑元件结构脆弱性与环境温度不确定性的 元件热稳定限额计算方法

唐陇军^{1,2}, 杨秋霖¹, 朱兰¹, 姬星羽¹, 牛培源¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网华东电力调控分中心, 上海 200120)

摘要: 计及电力系统不同元件运行需要的差异, 提出考虑元件结构脆弱性与环境温度不确定性的元件热稳定限额计算方法。综合转移系数复用和转移泰尔熵作为元件权重指标, 建立提高脆弱性元件安全裕度的热稳定限额计算模型。并进一步考虑元件环境温度的不确定性, 采用导线动态载流能力机会约束替代传统短时过载能力约束, 挖掘现有设备输电潜力, 降低环境温度超出规程约定值造成的风险。算例分析验证了该方法的有效性。

关键词: 热稳定限额; 结构脆弱性; 转移系数; 机会约束规划; 导线动态增容

Calculating method of the thermal stability control limit considering the structural vulnerability of the component and environmental temperature uncertainty

TANG Longjun^{1,2}, YANG Qiulin¹, ZHU Lan¹, JI Xingyu¹, NIU Peiyuan¹

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. East China Electric Power Control Center, Shanghai 200120, China)

Abstract: Taking the differences in the operation needs of different components of the power system into account, a method for calculating the thermal stability control limit of components considering the structural vulnerability of the components and the uncertainty of the environmental temperature is proposed. By integrating the transfer coefficient multiplexing index and transferring the Theil entropy index as component weight indicators, a thermal stability limit calculation model that improves the safety margin of vulnerable components is established. Furthermore, the uncertainty of the component's environmental temperature is considered by using the opportunity constraints of the dynamic current carrying capacity of the wire to replace the traditional short-term overload capacity constraints. The transmission potential of existing equipment is tapped and the risk caused by the environmental temperature exceeding the agreed value of the regulations is reduced. The analysis of a numerical example validates the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Foundation of China (No. 51807114) and Technology Program of Shanghai Municipal Science Committee (No. 18DZ1203200), and Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology (No. 13DZ2251900).

Key words: thermal stability control limit; structural vulnerability; transfer coefficient; opportunity constrained planning; dynamic capacity expansion of wires

0 引言

我国一次能源与负荷大致呈逆向分布, 大量电力需要远距离输送。随着社会发展, 送电规模

逐步增大, 但因输电走廊资源有限, 输电通道难以同步建设。如何利用现有网架输送更多电能成为安排电力系统运行方式的重要课题。考虑当前国内受端电网热约束突出, 优化配置主网元件的热稳定限额是提高现有输电元件利用率的重要手段。

当系统中的元件(本文指变压器或输电线路, 下同)因故障退出运行时, 会引发潮流转移及重新分布, 为了留有必要的故障处理时间和避免引发连锁

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51807114); 上海市科委项目资助(18DZ1203200); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900)

故障,正常运行时应对潮流进行控制,以保证系统在发生元件预想故障(一般为 $N-1$ 故障)后,剩余元件的潮流不超过其短时过载能力^[1],将该元件故障前有功潮流的控制上限定义为热稳定限额(以下简称限额)。

符合系统运行需要的限额应具有如下特点:第一,满足故障后剩余元件的短时过载能力的约束;第二,根据不同元件在系统中重要程度的不同合理分配;第三,能够充分利用元件的输电能力。目前,限额一般由电力工作人员借助电力系统分析计算软件,凭借经验计算得出。随着现代电力网络不断升级,网络结构日趋复杂,该计算方式过程繁杂,工作量巨大,且计算结果的正确性与计算人员的经验密切相关。文献[2]提出了一种元件限额的计算模型,通过线性规划算法迭代计算全网元件限额,相比手工计算提高了正确性与计算速度,但该方法按等裕度原则取定每轮迭代中相互约束元件的限额,没有考虑各元件因运行重要程度差异导致的不同安全裕度需要。

本文从电网运行方式安排的实际需要出发,首先提出考虑元件结构脆弱性的限额计算模型,以元件结构脆弱性指标作为权重调整限额分配,提高重要元件的安全裕度,使元件限额计算结果更加符合电网实际运行的需求。其次,考虑现行技术规程中导线短时过载能力是在较恶劣气象条件下计算得到的,用于限额计算时,其结果可能趋于保守,本文计及环境温度影响,基于导线动态增容技术与不确定理论,采用导线动态载流能力机会约束替代传统短时过载能力约束,挖掘元件输电潜力,同时也降低了少部分气象条件较极端的地区元件限额被“高估”的风险。最后,在 IEEE-39 节点系统上进行了算例分析,验证了本文方法的有效性。

1 元件权重的确定

为考虑电力系统运行对各元件安全裕度的不同要求,本文将元件的脆弱性指标作为权重,根据权重调整限额的分配,以满足系统实际运行需要。

近年来,国内外学者提出许多电力系统脆弱性的评价方法,根据其侧重点不同分为结构脆弱性和状态脆弱性。针对结构脆弱性的研究大部分都基于复杂网络理论^[3-7],该理论指出,国内外许多电网都具有小世界特性。结构脆弱性研究从网络拓扑结构出发,测算元件退出运行对电网的影响,该视角下的评估指标包括电气介数^[8]、节点影响力^[9]及传输贡献度指标^[10]等。状态脆弱性研究是从电网运行各状态变量偏离正常状态的程度出发,根据状态变量

与临界值的距离,判断系统的脆弱程度,该视角下的评估方法包括能量函数法^[11]、势能边界法^[12]、风险理论^[13]及潮流熵指标^[14-16]等。

一般来说,在限额有效期内,系统潮流会有较大的变化。由于基于状态变量的状态脆弱性指标在不同潮流情况下通常取值也不同,在运行中不利于实际工作的开展,所以本文在限额计算中采用结构脆弱性指标作为元件权重。根据元件间的潮流转移关系,本文提出了转移系数复用指标和转移泰尔熵指标。

1.1 转移系数复用指标

在我国区域主网架中,系统额定电压较高,元件退出运行前后其他元件的有功潮流变化一般具有较好的线性关系,局部线性化误差较小。因此,在 $N-1$ 故障发生后,可使用有功潮流转移系数^[2](以下简称转移系数)来描述故障后的潮流转移关系。

转移系数的定义为:元件 i 退出运行后,剩余元件有功潮流增量与元件 i 初始潮流的比值,即

$$t_{i-j} = \frac{P_j^i - P_j^0}{P_i^0} \quad i \neq j \quad (1)$$

式中: t_{i-j} 为元件 i 开断后对元件 j 的转移系数; P_j^i 为元件 i 开断后元件 j 的有功潮流; P_i^0 为元件 i 的初始有功潮流。

在电力网络中,潮流传输遵循基尔霍夫定律,功率的分配与路径的阻抗成反比。一般来说,最短路径上的元件数量相对较少,如果开断的元件在最短路径上,转移潮流则会流向元件数更多的路径。本文将元件开断后转移系数的总和定义为“转移系数复用”,由于故障后导致潮流反向越限的情况较少,计算时暂不考虑转移系数为负的情况,该指标一定程度上反映了元件退出运行后影响范围的大小。转移系数复用的表达式为

$$F_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n t_{i-j}, t_{i-j} \geq 0 \quad (2)$$

式中, n 为元件总数。

根据定义可知,在不发生负荷切除的情况下,转移系数复用下限为 1,即故障后各元件承担的转移潮流之和与故障元件原始潮流相等。元件的转移系数复用越大,退出运行后对剩余元件造成的负担越大,引发二次故障的风险越大,应重点关注。

图 1 为转移系数复用的简单示例,在不考虑网损的情况下,线路 1-3 开断,其转移潮流由线路 1-2 与 2-3 承担,转移系数复用为 2。线路 2-3 开断,其转移潮流由线路 1-3 承担,转移系数复用为 1。由

于线路 1-3 是输电的最短路径, 开断后导致潮流流向元件数更多的路径, 因此承担转移潮流的线路变多, 转移系数复用较大。而线路 2-3 开断后潮流仅由线路 1-3 承担, 转移系数复用较小。

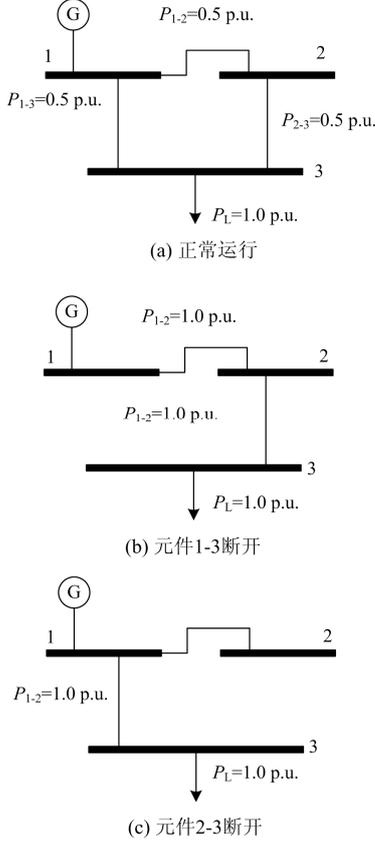


图 1 转移系数复用简单示例

Fig. 1 Simple example of transfer coefficient multiplexing index

1.2 转移泰尔熵指标

熵是一种反映事物演化有序程度的指标, 被广泛用于评价系统稳定程度和不确定性。在电力系统中, 泰尔熵被用于评价功率变化后潮流分布的均衡程度^[16], 其值越大代表分布的均匀程度越低。假设系统中有 n' 个不确定事件, 发生的概率分别为 $x_1, x_2, \dots, x_{n'}$, 且 $\sum_{i=1}^{n'} x_i = 1$, 系统泰尔熵定义为

$$T_s = \sum_{i=1}^{n'} x_i \times \log n' x_i \quad (3)$$

文献[16]所提出的潮流泰尔熵反映了元件断开后, 潮流在剩余元件上的分布情况。本文针对限额计算问题, 使用转移泰尔熵描述发生故障后潮流转移系数分布的均匀程度, 若某一元件的转移泰尔熵较大, 表示该元件故障引起的转移潮流将集中在少数剩余元件上, 引起连锁故障的风险较大。转移泰尔熵表达式为

$$T_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{t_{i-j}}{\sum_{j=1}^n t_{i-j}} \right) \times \log n \frac{t_{i-j}}{\sum_{j=1}^n t_{i-j}}, t_{i-j} \geq 0 \quad (4)$$

式中, T_i 为元件 i 故障后的转移泰尔熵。

1.3 结构脆弱性综合指标

转移系数复用以元件退出运行后影响范围的大小反映元件的脆弱性; 转移泰尔熵指标以元件退出运行后转移系数的均衡程度来衡量元件的脆弱性, 将两种指标综合作为元件的权重。因本文模型在分配限额时考虑的是元件的相对权重, 将元件结构脆弱性综合指标 C_i 定义为

$$C_i = F T_i \quad (5)$$

2 考虑元件结构脆弱性的限额计算模型

2.1 约束条件

在正常运行时元件限额应满足长时载流约束, 在发生故障时应满足短时过载约束。长时载流约束即各元件正常运行时的有功潮流都不超过其长期允许载流能力, 短时过载约束即故障后剩余元件上的有功潮流不超过其短时过载能力。

短时过载能力是指系统发生故障后, 元件在短时间内的允许载流能力。对于架空线路, 短时过载电流 I'_{\max} 在《稳定运行规定》中给出, 可以根据公式(6)得到线路短时过载能力。对于油浸式变压器^[17], 其短时过载电流的标么值不应超过 1.5, 过载时间一般小于 30 min; 对于干式变压器^[18], 由于超过规定值的短时负载所带来的危害比较严重, 规定最大的过载电流不允许超过其额定电流的 50%。根据铭牌上给出的额定容量 S_N 以及短时过载倍数 α_T , 通过式(7)计算得到变压器的短时过载能力。

$$\bar{E}'_L = \sqrt{3} U_N I'_{\max} \cos \varphi \quad (6)$$

$$\bar{E}'_T = \alpha_T S_N \cos \varphi \quad (7)$$

式中: \bar{E}'_L 与 \bar{E}'_T 分别为线路短时过载能力和变压器短时过载能力, 均用有功功率表示; U_N 为系统的额定电压; 功率因数 $\cos \varphi$ 按 0.9 计算。

式(6)与式(7)形式相似, 统一使用元件短时过载能力 \bar{E}'_j 表示。可以得到短时过载能力约束为

$$t_{i-j} \bar{P}_i + \bar{P}_j \leq \bar{E}'_j \quad i \neq j, i \in S, j \in T \cup L \quad (8)$$

式中: \bar{P}_i 与 \bar{P}_j 分别为元件 i 与元件 j 的限额; S 为预想事故集; T 为变压器集合; L 为线路集合。

2.2 计算模型

定义限额 \bar{P}_i 与初始潮流 P_i^0 的比值 $s_i = \bar{P}_i / P_i^0$ 为

元件的安全裕度,并根据元件权重 ω_i 对安全裕度进行分配,即

$$\frac{s_i}{s_j} = \frac{\omega_i}{\omega_j} = \frac{C_i}{C_j} \quad (9)$$

根据 s_i 的定义,进一步推得

$$\frac{\bar{P}_i}{\omega_i P_i^0} = \frac{\bar{P}_j}{\omega_j P_j^0} = s'_j \quad (10)$$

定义 s'_j 为元件 j 的加权裕度,目标函数描述为:使各元件加权裕度的最小值最大化。将最小加权裕度设为 s ,各元件的加权裕度满足不小于 s ,得到计算模型为

$$\begin{aligned} J &= \max s \\ \text{s.t.} \\ \bar{P}_i &\leq \bar{L}_i \\ \bar{P}_i &\geq s\omega_i P_i^0 \quad i \in S \\ t_{i-j} \bar{P}_i + \bar{P}_j &\leq \bar{E}'_j \quad i \neq j, i \in S, j \in T \cup L \end{aligned} \quad (11)$$

式中, \bar{L}_i 为元件的长期允许载流能力。

式(11)构成一个线性规划问题,可通过线性规划函数返回的松弛变量定位瓶颈约束,确定 s 对应元件,取定其限额并作为常数加入约束条件,然后进行新一轮求解,迭代计算直至所有限额被取定。

3 考虑元件结构脆弱性与环境温度不确定性的限额计算模型

2.1节中导线短时过载能力由《稳定运行规定》给出,该值是在较恶劣气象条件下计算得出的。实际上,线路的载流能力受到环境因素影响,按规程计算限额所使用的环境温度与实际环境温度之间存在较大差异,绝大部分情况下限额计算结果趋于保守,可以利用导线动态增容技术^[19-21]加以改进。

研究导线动态载流能力与各种环境因素的关系^[22]发现,日照强度对载流能力的影响较小,风速与环境温度对载流能力的影响较大。由于风的间歇性和随机性,预测限额有效期内的风速有很大困难,所以本文仍采用《稳定运行规定》中约定的日照和风速条件。而对分布相对较为具有规律性的环境温度,本文将作为不确定变量,构建机会约束规划模型进行求解。

3.1 机会约束规划

机会约束规划是解决不确定问题的一种方法,该方法允许优化结果在一定置信度下不满足约束条件。机会约束的一般形式^[23]为

$$P_r \{g(x, \xi) \leq 0\} \geq \beta \quad (12)$$

式中: P_r 为概率测度; x 为决策变量; ξ 为随机变

量; $g(x, \xi)$ 为随机约束函数; β 为置信水平。

该约束描述的是一个点 x 是可行的,当且仅当事件 $\{\xi | g(x, \xi) \leq 0\}$ 的概率测度不小于 β ,即违反约束条件的概率小于 $(1 - \beta)$ 。

3.2 含机会约束的限额计算模型

由于导线的动态载流能力是关于环境温度 T_a 的函数,环境温度的不确定性使元件限额的可行域发生变化。本文将机会约束表示为元件故障后,剩余导线上的潮流在一定置信度下不超过其动态载流能力,如式(13)所示。

$$P_r \{t_{i-j} \bar{P}_i + \bar{P}_j \leq \bar{E}'_j(T_a)\} \geq \beta_j \quad i \neq j, i \in S, j \in L \quad (13)$$

式中: $\bar{E}'_j(T_a)$ 为环境温度 T_a 下的动态载流能力; β_j 为元件 j 动态载流能力机会约束的置信度水平。

假设环境温度 T_a 服从正态分布函数^[24],即 $T_a \sim N(\mu, \sigma^2)$,其均值 μ 与方差 σ^2 均可从气象部门历史数据计算得出。求得环境温度的估计值后,可使用输电线路稳态热平衡方程^[19]计算导线动态载流能力,得到线路动态载流能力关于环境温度的函数,如式(14)所示。

$$\bar{E}'_j(T_a) = \sqrt{3}U_N \cos \varphi \sqrt{\frac{q_c(T_a) + q_r(T_a) - q_s}{R(T_c)}} \quad (14)$$

式中: q_c 为与风速、风向有关的对流散热; q_r 为由温差引起的辐射散热; q_s 为日照辐射吸热; T_c 为导体温度; $R(T_c)$ 为导体在温度 T_c 下的电阻。上述参数详细计算过程见文献[19]。

3.3 转换成确定性等价形式求解

为将式(13)进行确定性等价^[23],将其表示成式(15)的形式。

$$P_r \{h(x) \leq \xi\} \geq \beta \quad (15)$$

对于给定的 β ,必然存在数 K_β ,使得

$$P_r \{K_\beta \leq \xi\} = \beta \quad (16)$$

若用一个较小的数代替 K_β , $P_r \{K_\beta \leq \xi\}$ 会增大。由此可知 $P_r \{h(x) \leq \xi\} \geq \beta$ 当且仅当 $h(x) \leq K_\beta$,即 $h(x) \leq K_\beta = \Phi^{-1}(1 - \beta)$ 。鉴于函数的多解性,选取最大的解为 K_β ,则机会约束的确定性等价形式可表示为

$$h(x) \leq K_\beta = \sup \{K | K = \Phi^{-1}(1 - \beta)\} \quad (17)$$

式中: $\Phi(\bullet)$ 为随机变量 ξ 的概率分布函数; \sup 为所求集合的上界。

得到式(13)的确定性等价形式为

$$t_{i-j} \overline{P_i + P_j} \leq \overline{E'_j} \left(\sup \{ K | K = \Phi_j^{-1}(1 - \beta_j) \} \right) \quad (18)$$

$$i \neq j, i \in S, j \in L$$

根据上述推导得到

$$J = \max s$$

s.t.

$$\begin{aligned} \overline{P_i} &\leq \overline{L_i} \\ \overline{P_i} &\geq s \omega_i P_i^0 \quad i \in S \\ t_{i-j} \overline{P_i + P_j} &\leq \overline{E'_j} \quad i \neq j, i \in S, j \in T \\ t_{i-j} \overline{P_i + P_j} &\leq \overline{E'_j} \left(\sup \{ K | K = \Phi_j^{-1}(1 - \beta_j) \} \right) \\ &i \neq j, i \in S, j \in L \end{aligned} \quad (19)$$

式中, $\Phi_j(\bullet)$ 为线路 j 环境温度的概率分布函数。

4 算例分析

本文采用 IEEE39 节点系统^[10]进行仿真, 验证本文方法的有效性。该系统共包含 10 台发电机、39 条母线、19 个负荷及 46 个元件, 拓扑结构如图 2 所示。

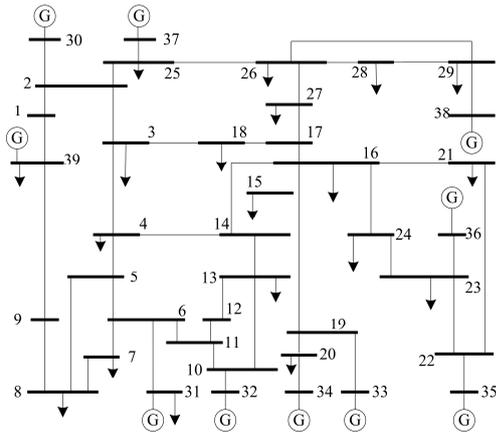


图 2 IEEE 39 节点系统接线图

Fig. 2 Connection diagram of IEEE 39-bus system

4.1 各元件权重计算与分析

依据式(2)与式(4)计算各元件的转移系数复用指标与转移泰尔熵指标, 并分别选取每个指标排序前十的元件示于表 1 和表 2。

表 1 转移系数复用指标排序结果

排序	元件	转移系数复用指标	排序	元件	转移系数复用指标
1	16-15	6.114	6	25-2	5.095
2	1-39	5.852	7	16-17	4.641
3	2-1	5.823	8	14-4	4.551
4	26-27	5.208	9	13-14	4.455
5	2-3	5.180	10	17-27	4.291

表 2 转移泰尔熵指标排序结果

Table 2 Sorting results of transfer Theil entropy index

排序	元件	转移泰尔熵指标	排序	元件	转移泰尔熵指标
1	28-26	1.465	6	21-16	1.126
2	22-23	1.331	7	22-21	1.084
3	24-16	1.309	8	23-24	1.018
4	29-26	1.233	9	5-8	0.949
5	29-28	1.179	10	13-12	0.930

如表 1 所示, 转移系数复用较大的元件具有以下特点: 1) 距离发电机或者负荷母线较近, 2) 构成了功率传输的重要通道, 3) 处于较大的环网中。这些元件退出运行会导致较大的潮流转移, 加重系统的负担。例如元件 16-15, 该元件处于大型环网之中, 又直接接于负荷母线, 与该元件有强转移关系(转移系数大于 0.5)的元件有 5 个, 一旦退出运行, 影响的元件较多, 引发连锁故障的风险较大。反之, 对于转移系数复用较小的元件, 如元件 7-8, 其所处环网较小, 与之有强转移关系的元件仅有 5-8 与 6-5, 退出运行对系统造成的影响较小。

如表 2 所示, 转移泰尔熵较大的元件一般处于元件数较少的断面, 同一断面内元件之间的转移系数较大, 若某一元件退出运行, 会导致断面内其余元件承担较大的潮流冲击, 组成断面的元件越少, 转移潮流就越容易集中在少数元件上, 潮流越限风险就越大。以由元件 28-26 与 29-28 组成的断面为例, 该断面内任一元件退出运行后转移潮流几乎全部由另一个元件承担, 易导致潮流越限, 转移泰尔熵指标能够有效识别出此类元件。

根据式(5), 可得到作为元件权重的脆弱性指标如图 3 所示。

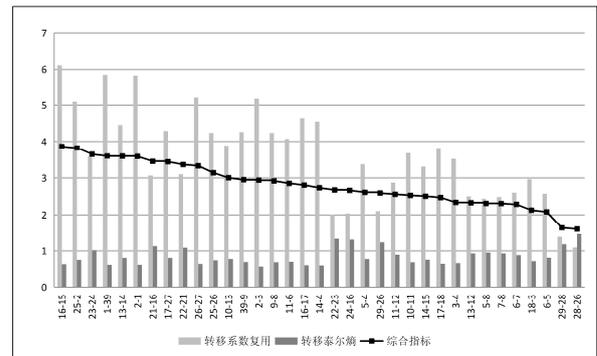


图 3 元件脆弱性指标

Fig. 3 Element vulnerability index

表 3 所示的, 是以权重最大的 10 个元件为例, 本文计算结果与采用有功输电介数^[25]方法计算结果的对比情况。

表 3 元件重要程度排序对比

Table 3 Comparison of component importance sorted result

排序	本文结构脆弱性综合指标	有功输电介数 ^[25]
1	16-15	16-17
2	25-2	16-19
3	23-24	16-15
4	1-39	14-15
5	13-14	17-27
6	2-1	25-2
7	21-16	26-27
8	17-27	18-3
9	22-21	2-3
10	26-27	13-14

可以发现, 元件 16-15、25-2、13-14、17-27、26-27 在两种方法中均被识别为重要元件, 结果存在差异的原因是评估方法考虑的因素不同。有功输电介数在评估元件脆弱性时考虑了负载率的影响, 识别结果多为负载率较高的元件, 但该结果受到特定潮流场景的影响, 并不适合作为限额计算中元件权重。例如元件 1-39 与 2-1, 在当前潮流场景下负载率较低, 有功输电介数中的排序不高。但是, 这两个元件均处于较大的环网中, 距离发电机与负荷较近, 与之有强转移关系的元件较多, 若在负载率较高的情况下退出运行, 将会对系统带来大量负担。转移系数复用指标与转移熵指标能有效识别出这些脆弱元件, 更适合作为限额计算中元件的权重。

4.2 考虑元件结构脆弱性的限额计算

由于电厂升压变压器最大可能出现的有功潮流是确定的, 且电网运行时应该使机组具备满出力的能力, 限额直接取短时过载能力(如元件 35-22)。对于子系统间联络线, 系统内元件退出运行对联络线的转移系数很小, 联络线的限额可近似取为其短时过载能力(如元件 19-16)。以上两类元件的限额对其他元件的限额计算几乎没有影响, 可作为已知量, 本文将这两类元件权重取为所有权重的均值。

本文参照 IEEE 标准计算导线稳态热平衡时的载流能力, 假设实验导线均为 LGJ-400/50 型号的 4 分裂线, 具体数据参照文献[22]。对于系统中的变压器, 本文假设额定容量均为 2 000 MVA, 短时过载倍数为 1.5。为了便于表述, 以下将文献[2]模型、本文第二节模型分别称为模型一、模型二。

图 4 对比了模型一与模型二的限额计算结果。可以看出, 与模型一相比, 模型二中权重较大的元件限额普遍有所提高。例如, 第一轮迭代的瓶颈约束是 21-22 的短时过载能力约束, 元件 21-22 与 23-24 的限额相互制约。由于元件 23-24 权重较高,

相比模型一的等裕度分配方式, 模型二根据元件权重提高了元件 23-24 的安全裕度; 同理, 第二轮迭代相互约束的元件为 11-6 与 13-14, 权重较高元件 13-14 的安全裕度也有所提升。

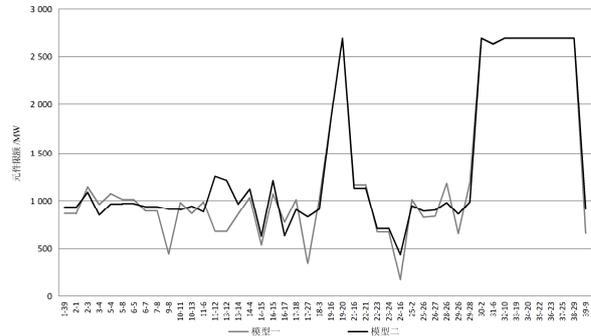


图 4 模型一与模型二计算结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation results between model 1 and model 2

元件 25-2 的权重虽然较大, 但在模型二中限额却有所下降, 原因是其本身具有较大的安全裕度, 而与之有强转移关系的元件 26-27 的安全裕度较小。如表 4 所示, 即使考虑了元件权重, 元件 26-27 的加权裕度仍小于元件 25-2。模型二优先调整了加权裕度比较紧张的元件限额, 使计算结果更符合实际的需要。

表 4 元件 25-2 与 26-27 的安全裕度与加权裕度对比

Table 4 Comparison of safety margin and weighted margin for components 25-2 and 26-27

元件	安全裕度	加权裕度
25-2	4.243	3.967
26-27	3.133	3.381

4.3 考虑环境温度不确定的限额计算

本文第三节模型(以下简称模型三)将环境温度考虑为服从正态分布的随机变量, 正态分布的均值与方差根据历史数据拟合得出。置信度可根据历史故障数据给定, 本文假设为 0.99。本文选取我国四川省 2017—2018 年 6—8 月的日最高气温作为样本, 该地区温度呈东高西低的分布, 不同区域的线路环境温度差异较大。利用各观测点的观测数据拟合出正态分布的概率密度函数, 观测数据取自国家气象信息中心。

本文选取三个观测点模拟该地区的气温分布, 以母线 16 和母线 25、18、14 为分割面, 将 IEEE39 节点划分为三个区域。其中, 元件 19-16、21-16、22-21、22-23、23-24、24-16 处在较为炎热的区域。

图 5 对比了模型二与模型三的限额计算结果,

可以看出, 模型三通过导线动态增容技术, 调整了不同气候区域的元件限额。10-11、3-4、5-8 等 28 个元件所在的地区环境温度较低, 使用模型三计算得到的限额大于模型二, 挖掘了元件输电潜力; 而对于 21-22、23-24、24-16 等 8 个元件来说, 所在区域温度较高, 可能发生计算采用载流能力超过当前环境温度下允许载流能力的情况, 模型三的结果降低了这种风险。

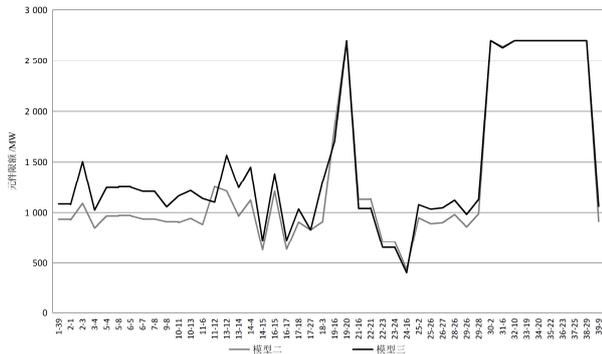


图 5 模型二与模型三计算结果对比
Fig. 5 Comparison of calculation results between model 2 and model 3

5 结论

本文建立了考虑元件结构脆弱性的限额计算模型, 首先提出了一种结构脆弱性综合评估指标, 从拓扑结构出发评价元件在限额计算中的重要程度, 所提指标以转移系数为基础, 从潮流转移关系上识别出针对限额计算问题的重要元件。将该指标作为元件权重建立数学模型计算元件限额, 根据权重调整各元件安全裕度的分配, 在满足安全裕度约束的基础上提高重要元件的安全裕度。在此基础上, 进一步考虑环境温度影响, 利用导线动态增容技术, 提高温度较低地区元件限额, 挖掘现有设备输电潜力, 降低温度较高地区元件限额计算采用载流能力超过实际气象条件允许载流能力的风险。

本文方法在限额计算工作中考虑了元件结构脆弱性与环境温度, 使计算结果更符合实际生产需要, 可为电网运行方式专业人员计算限额提供借鉴, 减少人工计算工作量。后续研究可考虑纳入多种潮流方式, 以增强限额计算结果适应多场景的能力。

附录 A

表 A 各元件信息

Table A Component information

元件	模型一/MW	模型二/MW	模型三/MW	转移系数复用	转移熵	结构脆弱性综合指标
1-39	865	934	1 136	5.852	0.614	3.595
2-1	860	928	1 130	5.823	0.616	3.584
2-3	1 146	1 090	1 488	5.180	0.567	2.936
3-4	962	848	1 056	3.519	0.664	2.336
5-4	1 075	966	1 268	3.373	0.774	2.611
5-8	1 015	972	1 276	2.435	0.949	2.310
6-5	1 011	968	1 270	2.570	0.809	2.079
6-7	891	937	1 230	2.597	0.879	2.282
7-8	891	937	1 229	2.480	0.930	2.306
9-8	443	909	1 089	4.236	0.689	2.917
10-11	982	902	1 184	3.675	0.688	2.527
10-13	864	943	1 238	3.882	0.773	3.002
11-6	989	882	1 158	2.868	0.892	2.558
11-12	680	1 255	1 076	4.074	0.700	2.852
13-12	678	1 212	1 591	2.502	0.930	2.327
13-14	859	965	1 267	4.455	0.807	3.594
14-4	1 036	1 123	1 474	3.307	0.757	2.504
14-15	537	627	739	4.551	0.600	2.730
16-15	1 073	1 211	1 428	6.114	0.631	3.860
16-17	772	633	747	4.641	0.604	2.805
17-18	1 013	906	1 102	3.817	0.647	2.468
17-27	337	829	829	4.291	0.802	3.440

续表 A

元件	模型一/MW	模型二/MW	模型三/MW	转移系数复用	转移熵	结构脆弱性综合指标
18-3	1 017	910	1 319	2.963	0.717	2.124
19-16	1 845	1 845	1 699	/	/	/
19-20	2 700	2 699	2 699	/	/	/
21-16	1 165	1 130	1 041	3.066	1.126	3.451
22-21	1 171	1 136	1 046	3.102	1.084	3.364
22-23	673	708	652	2.009	1.331	2.675
23-24	676	711	655	3.583	1.018	3.645
24-16	168	437	402	2.034	1.309	2.662
25-2	1 014	948	1 128	5.095	0.750	3.820
25-26	824	890	1 082	4.237	0.741	3.138
26-27	835	901	1 096	5.208	0.639	3.329
28-26	1 183	980	1 174	1.093	1.465	1.602
29-26	655	859	1 028	2.100	1.233	2.588
29-28	1 192	988	1 183	1.387	1.179	1.636
30-2	2 700	2 700	2 700	/	/	/
31-6	2 643	2 639	2 625	/	/	/
32-10	2 700	2 700	2 700	/	/	/
33-19	2 700	2 700	2 700	/	/	/
34-20	2 700	2 700	2 700	/	/	/
35-22	2 700	2 700	2 700	/	/	/
36-23	2 700	2 700	2 700	/	/	/
37-25	2 700	2 700	2 700	/	/	/
38-29	2 700	2 700	2 700	/	/	/
39-9	658	913	1 112	4.260	0.692	2.949

参考文献

- [1] 范京艺, 毛安家, 刘岩, 等. 基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 116-121.
FAN Jingyi, MAO Anjia, LIU Yan, et al. Analysis of the short-term overload capability of transmission section based on the load and ambient temperature curve[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 116-121.
- [2] 陈祎, 郭瑞鹏, 叶琳, 等. 电网断面热稳定限额计算模型及方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 20-24.
CHEN Yi, GUO Ruipeng, YE Lin, et al. Calculation model and method for thermal stability control limit to transmission interfaces in a power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 20-24.
- [3] 欧阳莹. 复杂系统理论基础[M]. 田宝国, 周亚, 樊瑛, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2002.
- [4] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24, 29.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological models of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24, 29.
- [5] JING Z, XIN F, ZHUANG L. Energy-balanced strategy for wireless sensor networks by utilizing complex networks synchronization theory[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 97(3).
- [6] XING Y, LU J, CHEN S, et al. Vulnerability analysis of urban rail transit based on complex network theory: a case study of Shanghai Metro[J]. Public Transport, 2017, 9(3).
- [7] CHOROZOGLU D, KUGIUMTZIS D, PAPANITRIOU E. Application of complex network theory to the recent foreshock sequences of Methoni (2008) and Kefalonia (2014) in Greece[J]. Acta Geophysica, 2017, 65(3).
- [8] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 使用等值导纳进行电力系统小世界特性识别[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 20-26.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Small-world feature identification based on equivalent admittance for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 20-26.
- [9] 吴润泽, 吴万旭, 李莉, 等. 基于节点影响力的电力通信网拓扑结构诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 147-155.
WU Runze, WU Wanxu, LI Li, et al. Topology diagnosis of power communication network based on node

- influence[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 147-155.
- [10] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 6-12.
JU Wenyun, LI Yinhong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribution degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 6-12.
- [11] 黄昭蒙, 李华强, 杜涛, 等. 基于支路能量函数的脆弱支路评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 7-11.
HUANG Zhaomeng, LI Huaqiang, DU Tao, et al. Vulnerable branch assessment based on branch energy function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 7-11.
- [12] 卢锦玲, 姬群星, 朱永利. 基于能量函数法的电网脆弱性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 30-33.
LU Jinling, JI Qunxing, ZHU Yongli. Power grid vulnerability assessment based on energy function[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 30-33.
- [13] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 12-19.
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Risk-based vulnerability assessment in complex power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 12-19.
- [14] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于自组织临界理论的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 18-26.
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Vulnerable line identification of power grid based on self-organizing critical theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 18-26.
- [15] LI Canbing, XIAO Liwu, CAO Yijia, et al. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2014, 2(2): 173-180.
- [16] 张弘历, 李华强, 杨植雅, 等. 基于潮流增长率泰尔熵的脆弱支路辨识[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2340-2346.
ZHANG Hongli, LI Huaqiang, YANG Zhiya, et al. Identification of vulnerable line based on the Theil entropy of flow growth rate[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2340-2346.
- [17] 油浸式电力变压器负载导则: GB/T 15164—1994[S].
- [18] 干式电力变压器负载导则: GB/T 17211—1998[S].
- [19] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1138-1144.
HUANG Xinbo, SUN Qindong, ZHANG Guanjun, et al. Theoretical calculation and application study on real-time capacity-increase of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1138-1144.
- [20] HECKENBERGEROVA J, HOSEK J. Dynamic thermal rating of power transmission lines related to wind energy integration[C] // 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, May 18-25, 2012, Venice, Italy.
- [21] 刘刚, 阮班义, 林杰, 等. 架空导线动态增容的热路法稳态模型[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1107-1113.
LIU Gang, RUAN Banyu, LIN Jie, et al. Steady-state model of thermal circuit method for dynamic overhead lines rating[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1107-1113.
- [22] 殷治军. 基于气象数据的架空输电线路热载荷能力研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
YIN Zhijun. Study on thermal load capacity of overhead transmission lines based on meteorological data[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [23] 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [24] LINDAO M, RICHARDW K, STEPHENH S, 等. 极端高温现象: 概率随平均温度变化而变化[J]. 气象科技, 1986(5): 48-55.
LINDAO M, RICHARDW K, STEPHENH S, et al. Extremely high temperature phenomena: Probability varies with average temperature changes[J]. Meteorological Science and Technology, 1986(5): 48-55.
- [25] 张才斌, 游昊, 李本瑜, 等. 计及拓扑结构和运行状态的支路重要度评估方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 15-20.
ZHANG Caibin, YOU Hao, LI Benyu, et al. Assessment method of branch importance considering topological structure and operation state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 15-20.

收稿日期: 2019-09-18; 修回日期: 2020-02-05

作者简介:

唐陇军(1977—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析、电网调度运行; E-mail: tlj_net@sina.cn

杨秋霖(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 529097156@qq.com

朱兰(1978—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为微网规划与运行。E-mail: zhulant@163.com

(编辑 周金梅)