计及传播路径的电力系统连锁故障多阶段阻断控制

刘雨濛，顾雪平，王 涛
（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘要：开展连锁故障的多阶段阻断控制研究对于电力系统安全稳定运行及电网的升级改造均具有重要的应用价值。简要阐述了过载主导型连锁故障的传播过程，并分析了该类型的连锁故障传播路径与阻断控制策略间的交互影响。在此基础上，针对考虑传播路径的连锁故障开展了多阶段阻断控制研究，提取了故障/非故障路径线路的停运概率约束以及潮流控制力度约束，建立了以期望控制成本和失负荷风险之和最小为目标的考虑传播路径连锁故障多阶段控制模型。算例分析结果表明，基于该连锁故障阻断控制模型求得的控制策略能够在驱动连锁故障仍按预测传播路径发展的同时有效降低故障路径内线路故障概率，为连锁故障的防御决策提供了重要参考。

关键词：电力系统；连锁故障；传播路径；多阶段阻断控制；运行风险
中图分类号：TM 711 **文献标志码**：A DOI：10.16081/j.epae.202111009

0 引言

近年来，印度7·30大停电[1]、美国8·14大停电[2]等多起大停电事故在全球范围内的频发引起了国内外的广泛关注。停电报告指出上述大停电事故大多是由连锁故障引起的，具体表现为发电机、输电线路故障等局部小干扰通过网络连接而导致电网组件相继故障的恶性连锁反应。因此，快速准确地定位连锁故障发展演化路径，并针对性地制定连锁故障事故前预防控制、事故中阻断控制的防御控制体系，对保障电力系统安全运行、减小停电故障损失具有重要意义。

目前，根据建模思路的不同，可将连锁故障阻断控制研究划分为基于复杂系统[3-4]/复杂网络[5-6]的宏观系统控制方法及基于确定性安全准则[7-11]/风险理论[12-15]的还原理论控制方法。基于复杂系统控制方法的研究主要针对系统自组织临界态，通过采用调整承载结构分布[3]、主动切负荷[4]等相应控制措施释放系统运行压力，以减少大规模连锁故障的发生，遏制系统朝自组织临界态演化。基于复杂网络理论的控制方法，以电网拓扑为核心，从网络拓扑角度提取电网网架结构特征参数，从而优化节点负载[5]，改善网络拓扑结构[6]，以增强电力网络抵抗连锁故障发展演化的能力，降低全网连锁故障规模。上述宏观系统控制方法在一定程度上突破了还原论，但是未充分考虑电力潮流约束和运行状态，导致其控制方法的可信度大幅降低并且难以开展实际运用。基于还原论的研究大多从网络的负荷转移角度切入，采用基于灵敏度[7]、优化规划[8]等求解方法，得到相应的发电机调整、负荷削减阻断控制方案，以切断连锁故障的传播路径，避免潮流转移后故障进一步扩散。此外，安全约束最优潮流SCOPF（Security Constrained Optimal Power Flow）模型[9]被提出，以保障系统在确定性故障状态下正常安全运行。在此基础上，文献[8,10]开展了预防控制视角下安全约束最优潮流模型研究。计及预防控制的安全约束最优潮流模型强制要求在无需发电机再调度的情况下，任意预想事故发生后均不会出现潮流越限等系统异常运行问题，导致求解困难且成本较大，因此计及校正控制的安全约束最优潮流模型应运而生。针对预防控制与校正控制的互补性，文献[11]探讨了综合考虑预防控制与校正控制的安全约束最优潮流控制方法。上述基于确定性安全准则的控制方法较多针对系统$N-1$/$N-2$故障，涉及多重连锁故障的研究较少，并且不具备感知风险和以故障严重度差异化调度的能力，导致求解结果偏向保守，控制代价较高。在此基础上，以风险评估为核心，计及系统中元件不确定性的风险理论在电网连锁故障控制中得到了广泛的研究。文献[12]首次提出了考虑线路过载风险性指标和电压越限风险指标的预防控制模型。文献[13]构建了故障前预防控制、故障后风险度最高环节阻断控制的风险协调控制模型，但是该模型未考虑调度人员对不同控制方法安全与控制代价间的偏好性。文献[14]采用多目标粒子群优化算法求取模型的Pareto解集，并利用熵权决策理论表征偏好性，以确定最终风险协调控制方案。但是，目前基于风险理论针对电网连锁故障事故中的阻断控制研究大多仅针对某一特定连锁故障阶段展开，未充分考虑控制策略与连锁故障传播路径的相互作用，制定符合连锁故障多阶段传播

收稿日期：2021-01-12；**修回日期**：2021-09-27
基金项目：河北省自然科学基金资助项目（E2019502195）
Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province（E2019502195）

特性的分阶段批次阻断控制策略。文献[15]研究表明连锁故障多阶段控制策略能够有效降低连锁故障的风险,并且多阶段控制方案的控制效果远优于单阶段控制,但是文献[15]所提模型仅计及了连锁故障路径内线路故障概率,而未考虑非故障路径线路故障概率以及在控制过程中控制策略对非故障路径线路故障概率的影响,由此可能出现控制策略改变连锁故障传播路径的问题,从而使得求解所得控制方案失效。因此,针对特定的连锁故障传播开展阻断控制研究时,如何在阻断连锁故障传播的同时控制连锁故障仍能按照预测路径演化,避免出现非故障路径线路的故障概率反超故障路径线路的故障概率这类顾此失彼的现象,是本文将研究的问题。

本文首先以电网当前运行状态为桥梁,分析了连锁故障传播路径和阶段控制措施二者之间的交互影响作用。在此基础上,提炼出阶段控制中,在后续故障选择标准下连锁故障发展过程按预测路径传播的约束集,并且构建了以控制成本和失负荷风险最小为目标的计及传播路径控制的连锁故障多阶段阻断控制模型。最后,以IEEE 39节点和IEEE 118节点系统为例对本文方法的有效性进行了验证,并与未考虑传播路径控制约束的模型进行了对比和分析。

1 连锁故障路径与阻断控制策略间的交互影响

1.1 连锁故障路径的预测

为了更好地表述多阶段控制策略与连锁故障间的交互影响,本文对过载主导型的连锁故障传播路径的预测进行简要阐述。首先预设线路开断为初始故障,然后根据线路停运概率模型进行后续故障搜索,通常选取线路停运概率最大的线路为后续故障线路,最终依照相应的终止判据结束连锁故障的搜索,生成连锁故障传播路径。其中,线路停运概率模型通常采用分段曲线[16]的模式进行描述:

$$w_{\mathrm{L}_i}=\begin{cases}P_{\mathrm{H}} & 0<P_{\mathrm{L}_i}\leqslant P_{\mathrm{L}_i}^{\max}\\ P_{\mathrm{H}}+\dfrac{1-P_{\mathrm{H}}}{(b-1)P_{\mathrm{L}_i}^{\max}}(P_{\mathrm{L}_i}-P_{\mathrm{L}_i}^{\max}) & P_{\mathrm{L}_i}^{\max}<P_{\mathrm{L}_i}\leqslant bP_{\mathrm{L}_i}^{\max}\\ 1 & P_{\mathrm{L}_i}>bP_{\mathrm{L}_i}^{\max}\end{cases}\tag{1}$$

式中:w_{L_i}、P_{L_i}分别为输电线路L_i的故障概率和潮流;$P_{\mathrm{L}_i}^{\max}$为输电线路L_i的传输容量极限;P_{H}为保护隐性故障的概率,取值为0.01[15];b为极限倍数,取值为1.4[17]。由此可知,输电线路L_i的故障概率仅与输电线路L_i的潮流P_{L_i}和传输容量极限$P_{\mathrm{L}_i}^{\max}$相关。

当连锁故障演化发展过程中不涉及任何控制措施,即电力系统保持基态运行方式时,可由支路开断分布因子法[18]求得线路L_j开断后线路L_i的潮流$P_{\mathrm{L}_i,\mathrm{L}_j}$,计算公式如下:

$$P_{\mathrm{L}_i,\mathrm{L}_j}=D_{i\text{-}j}P_{\mathrm{L}_j}+P_{\mathrm{L}_i}\tag{2}$$

式中:$D_{i\text{-}j}$为支路i-j开断分布系数,其值与线路电抗、电网网架结构等参数相关。

因此,对于某一保持基态运行方式的电网而言,当其初始运行状态和电网结构确定时,在过载主导型的连锁故障传播过程中后一阶段的故障线路及其故障概率仅与前一阶段的故障线路有关。换言之,过载主导型的连锁故障路径中前、后故障之间有相当明确的因果关联,前一故障改变了系统网架结构以及潮流等电网运行状态,从而确定了下一故障的触发。

1.2 交互影响的描述

在电力系统实际运行中通常会采取调度发电机出力、削减负荷等控制策略遏制由网络过负荷转移而引发的连锁故障传播。以直流潮流模型为基础的线路潮流方程为:

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}-\boldsymbol{G}\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}\tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{P}$为输电线路有功功率向量;$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}$为发电机有功出力向量;$\boldsymbol{P}_{\mathrm{D}}$为节点有功负荷向量;$\boldsymbol{G}_{\mathrm{g}}$为节点-支路转移分布因子矩阵$\boldsymbol{G}$中与发电机节点对应的列构成的矩阵。由式(3)可知,当调整系统注入功率以改变电网当前运行状态时,输电线路所载潮流随之改变。与此同时,采用式(1)所求得的线路故障概率以及所有在运线路故障概率的最大值也受到影响,而根据上文所提的连锁故障路径预测方法,线路停运概率最大值决定着连锁故障的后续故障。因此,控制策略能够影响连锁故障在各阶段的故障概率,甚至改变连锁故障的传播路径。

类似地,连锁故障的后续故障及其所载潮流也影响着控制措施的优化决策。不同的线路开断对应着不同的电网网架结构。由式(2)可知,与网架结构强相关的$D_{i\text{-}j}$和故障线路所载潮流均会导致各支路所载潮流发生不同程度的偏移,同时控制措施的优化会因为电网潮流分布状态的差异性而具有完全不同的优化结果。此外,由式(3)可知,在相同的节点注入功率下,不同的电网结构所对应的$\boldsymbol{G}_{\mathrm{g}}$和$\boldsymbol{G}$也影响着线路所载潮流。由此可见,连锁故障传播路径与控制措施通过影响电网当前运行状态实现二者间的交互影响,具体如图1所示。

由图1可知,连锁故障传播至第一阶段时,线路L_1被选定为初始故障线路,由电网网架结构变化而引发的潮流转移改变了电网当前运行状态,随后针对第一阶段故障采取的控制方案通过调度发电机出力以及负荷削减进一步改变了电网当前运行状态,二者共同影响了第二阶段的故障线路L_2及其故障概

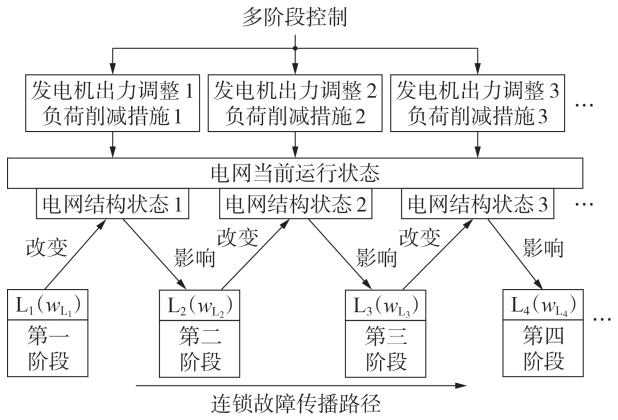

图 1　连锁故障路径与控制策略的交互影响

Fig.1　Interaction effects between cascading failure paths and control schemes

率w_{L_2}。依此类推，直至输电线路所载潮流小于其给定的阈值为止。从理论而言，连锁故障传播过程可以看作是电力系统潮流模型的一系列拓扑切换，而多阶段阻断控制则是通过调整模型的注入功率以确保连锁故障过程收敛至稳定运行点（即电网中无潮流越限的输电线路）。在总体控制最优的目标驱动下，阻断控制与连锁故障扩散传播的动态博弈。

2　考虑传播路径的连锁故障多阶段控制模型及求解方法

由第 1 节分析可知，阶段控制策略在一定程度上影响着连锁故障的传播路径，因此对于计及传播路径控制的连锁故障阻断研究而言，必须设置相应的约束以限制阶段控制策略的影响，使故障仍然按预测路径级联演化发展。在此基础上，本文构建了考虑传播路径的连锁故障多阶段控制模型。以调整发电机出力和切负荷作为控制手段，以连锁故障传播过程中各个阶段的概率期望成本和失负荷风险最小为目标，多阶段分批次阻断连锁故障的传播。

2.1　多阶段控制模型

2.1.1　目标函数

连锁故障多阶段控制的目标是以最小的经济控制成本最大限度地降低连锁故障不确定性失负荷风险，目标函数f的计算公式如下：

$$\min f=\sum_{k=1}^{l}p_k\left[\alpha\left(\sum_{g=1}^{N_G}\Delta P_{uGg}^{k}+\sum_{g=1}^{N_G}\Delta P_{dGg}^{k}\right)+\beta\sum_{n=1}^{N_D}\Delta P_{Dn}^{k}\right] \tag{4}$$

$$p_k=\prod_{m=1}^{k}w_{L_i}^{m} \tag{5}$$

式中：l为连锁故障演化路径长度；p_k为连锁故障演化至第k阶段的概率；ΔP_{uGg}^{k}、ΔP_{dGg}^{k}分别为第k阶段发电机g上调和下调的有功功率；ΔP_{Dn}^{k}为第k阶段节点n的负荷削减量；N_G、N_D分别为系统中参与调度的发电机和负荷节点总数；α为发电机单位调度有功功率的成本系数；β为负荷节点单位削减负荷的成本系数。

2.1.2　传播路径控制约束

本文针对已知传播路径的连锁故障多阶段阻断控制进行研究，因此在连锁故障预测过程和连锁故障控制过程中均应采用同一后续故障选择标准，即选取线路停运概率最大值为后续故障线路。若连锁故障将传播至第k阶段，由于第k–1阶段的控制策略使得第k阶段的非故障路径线路的故障概率大于预测传播路径中第k阶段线路的故障概率。在控制措施的影响下连锁故障传播路径有较大可能性会脱离原预测的特定传播路径，则后续针对原预测传播路径的控制措施可能无效，甚至存在加速故障恶性演化的可能。因此，为避免这类情况的发生，直接引入连锁故障第k阶段故障线路概率约束，可表示为：

$$w_{L_i}^{k}>w_{L_e}^{k}\quad \forall L_e\in E_k \tag{6}$$

式中：E_k为除了前k–1阶段已开断线路和第k阶段预测开断线路的系统中其他线路集合，即第k阶段的非故障路径线路L_e所组成的集合。式(6)的物理意义为针对已知传播路径的连锁故障多阶段控制中第k阶段预测故障线路L_i的故障概率需大于第k阶段中所有可能开断线路的故障概率，确保在上述后续故障选择标准前提下阶段控制措施仅能影响阶段故障线路的故障概率而不改变阶段故障线路。

2.1.3　线路潮流控制力度约束

为了有效平衡多阶段控制的控制成本与失负荷风险，本文针对各个控制阶段内预测传播路径的开断线路和非故障路径的线路分别设定相应的控制因子γ_1和γ_2，以表征控制措施对这 2 类线路所载潮流的控制力度。随着控制因子的减小，控制措施对线路所载潮流的控制力度逐渐增大，允许线路所载潮流上限值逐渐减小。连锁故障中第k阶段线路潮流控制力度约束可表示为：

$$\begin{cases}\left|P_{L_i}^{k}\right|\leqslant\gamma_1 P_{L_i}^{\max} & k=1,2,\cdots,l-1\\ \left|P_{L_i}^{k}\right|\leqslant P_{L_i}^{\max} & k=l\end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases}\left|P_{L_e}^{k}\right|\leqslant\gamma_2 P_{L_e}^{\max} & k=1,2,\cdots,l-1\\ \left|P_{L_e}^{k}\right|\leqslant P_{L_e}^{\max} & k=l\end{cases}\quad \forall L_e\in E_k \tag{8}$$

式中：P_*^k为第k阶段线路“*”的有功功率。式(7)和式(8)表征了在考虑传播路径的连锁故障多阶段阻断控制中前l–1阶段允许线路潮流越限，且预测传播路径线路和非故障路径线路的潮流越限控制力度可能存在差异，但是在第l阶段必须阻断连锁故障的传播。

2.1.4　其他约束

在各阶段控制中，系统还需满足如下等式和不

等式约束：

$$\sum_{s\in G_n}\left(P_{Gs}+\sum_{m=1}^{k}\Delta P_{uGs}^{m}-\sum_{m=1}^{k}\Delta P_{dGs}^{m}\right)+\sum_{L_o\in L_n^{to}}P_{L_o}^{k}-\sum_{L_d\in L_n^{fr}}P_{L_d}^{k}=P_{Dn}-\sum_{m=1}^{k}\Delta P_{Dn}^{m} \tag{9}$$

$$P_{Gg}^{\min}\leqslant P_{Gg}+\sum_{m=1}^{k}\Delta P_{uGg}^{m}-\sum_{m=1}^{k}\Delta P_{dGg}^{m}\leqslant P_{Gg}^{\max} \tag{10}$$

$$0\leqslant\Delta P_{uGg}^{k}\leqslant\Delta P_{uGg}^{\max} \tag{11}$$

$$0\leqslant\Delta P_{dGg}^{k}\leqslant\Delta P_{dGg}^{\max} \tag{12}$$

$$0\leqslant\Delta P_{Dn}^{k} \tag{13}$$

$$0\leqslant\sum_{m=1}^{k}\Delta P_{Dn}^{m}\leqslant P_{Dn} \tag{14}$$

式中：G_n为连接在节点n上的发电机集合；P_{Gs}为发电机s在系统初始运行状态下的有功出力；L_n^{to}和L_n^{fr}分别为末端和首端是节点n的线路集合；P_{Dn}为系统初始运行状态下节点n的有功负荷；上标max、min分别对应各变量的上限值和下限值。式(9)—(14)为潮流约束，分别为多阶段控制中第k阶段的节点功率平衡约束、发电机出力约束、发电机上调约束、发电机下调约束、阶段切负荷约束和累计切负荷约束。

2.2 模型的求解

2.1节所建立的考虑传播路径的连锁故障多阶段控制模型属于非线性规划问题，对其直接进行求解难度较大，因此本文借鉴文献[19]中所提的双层分解寻优方案的思路并采用遗传算法进行求解。双层分解寻优方案中外层为连锁故障传播过程中各阶段线路故障概率的优化，内层为在已知连锁故障传播过程中各阶段线路故障概率的前提下，各个阶段发电机调度和负荷削减的优化。模型求解流程图见附录A图A1。

3 算例分析

本文采用IEEE 39节点系统(见附录A图A2)和IEEE 118节点系统(见附录A图A3)对所提方法进行验证，以分析对应的结果。IEEE 39节点系统由10台发电机、39条母线和46条线路组成，总装机容量达7 367 MW，初始状态下总负荷为6 254.2 MW。在IEEE 39节点系统分析过程中，本文设置将输电线路的传输容量缩减为其原始值的95%，线路17-18的传输容量修改为300 MW(工况1)，其余参数设置如下：预设线路6-11开断为初始故障，发电机调度成本α和负荷削减成本β分别为1 $/MW和100 $/MW[20]，发电机各阶段有功调整量为发电机容量的15%，控制因子γ_1和γ_2均取值为1.4。

3.1 传播路径控制的连锁故障多阶段阻断分析

根据1.1节可搜索得到，在不涉及任何控制措施的情况下，初始故障为线路6-11开断的过载主导型连锁故障传播路径及由式(1)计算所得的各阶段开断线路的故障概率如表1所示。表中，Stage 1至Stage 4分别对应第一阶段至第四阶段。

表1 无控制措施下连锁故障预测传播路径及故障概率

Table 1 Forecasting propagation path and failure probability of cascading failures without control measures

故障阶段	开断线路	故障概率	故障阶段	开断线路	故障概率
Stage 1	6-11	1	Stage 3	17-18	1
Stage 2	4-14	0.59	Stage 4	2-25	1

由表1可知，由于线路6-11为初始预设故障，所以第一阶段故障概率取值为1，同时线路6-11的开断使得线路4-14所承载潮流由初始运行状态下的267.92 MW上升至586.82 MW，超过其500 MW的热稳定容量极限。随着连锁故障路径的演化，流过第三阶段故障线路17-18和第四阶段故障线路2-25的有功功率分别为669.61 MW和986.74 MW，使得线路故障概率高达1。

在此基础上，采用本文建立的模型(记为模型1)针对上述连锁故障传播路径进行多阶段控制求解，实施控制措施后连锁故障各阶段故障概率最大的线路及其故障概率如表2所示。

表2 采用控制措施后各阶段故障概率最大的线路及其故障概率

Table 2 Line with highest failure probability and its failure probability with control measures at each stage

故障阶段	开断线路	故障概率	故障阶段	开断线路	故障概率
Stage 1	6-11	1	Stage 3	17-18	0.06
Stage 2	4-14	0.04	Stage 4	2-25	0.16

对比表1和表2可知，采用模型1计算所得的控制措施可在保障连锁故障按预测传播路径发展的同时，有效降低连锁故障各个阶段开断线路的故障概率。

考虑传播路径的连锁故障多阶段控制中各个阶段的阻断控制方案见附录A表A1，在实际调控中可按照该多阶段阻断控制方案进行级联过载效应。

3.2 传播路径控制约束对阻断结果的影响

如果在计及传播路径控制的连锁故障多阶段阻断中不考虑传播路径控制约束，即去除约束条件(式(6))，则将该模型记为模型2。求解模型2，并与本文所提的模型1的结果进行比较，具体如表3所示。表中加粗的数据为预测传播路径各阶段开断线路及其在模型2求解控制方案下的故障概率。需要说明的是，初始故障为预设故障，因此不存在第一阶段的线路故障概率排序。此外，当线路故障概率相同时，按线路负载率降序排序。

表3　采用控制措施后各阶段线路故障概率排序

Table 3　Line failure probability ranking with control measures at each stage

排序	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 4	
	线路	故障概率	线路	故障概率	线路	故障概率	线路	故障概率
1	6-11	1	2-3	0.21	2-3	1	2-3	1
2	6-11	1	**4-14**	**0.01**	3-4	0.25	3-4	0.58
3	6-11	1	13-14	0.01	**17-18**	**0.02**	**2-25**	**0.03**

由表3可知，按照模型2求解的多阶段控制方案在采用第一阶段控制后，预测传播路径中第二阶段故障线路4-14的故障概率为0.01，而此时第二阶段故障概率最大的线路为线路2-3，其故障概率0.21远大于预测传播路径中本阶段开断线路。因此，在实施第一阶段控制措施后，连锁故障级联效应更倾向于开断非故障路径上的线路2-3，使得连锁故障传播路径有较大可能性会偏离原预测传播路径。同理，随着第三阶段和第四阶段预测传播路径上开断线路的故障概率排序进一步降低，连锁故障愈发倾向于沿着非故障路径上故障概率较大的线路开断演化，逐步偏离预测传播路径。

进一步分析采用模型2所求解得到的控制方案，以线路6-11开断为初始故障，各阶段断开故障概率最大值所对应线路的连锁故障传播路径以及各阶段故障概率，如表4所示。

表4　模型2采用控制措施后连锁故障传播路径及故障概率

Table 4　Propagation path and failure probability of cascading failures with control measures in Model 2

故障阶段	开断线路	故障概率	故障阶段	开断线路	故障概率
Stage 1	6-11	1	Stage 4	4-14	0.41
Stage 2	2-3	0.21	Stage 5	4-5	1
Stage 3	17-18	0.91			

由表4可知，在针对以预测传播路径为线路6-11、线路4-14、线路17-18以及线路2-25的连锁故障控制过程中，采用模型2所求解的控制策略使得连锁故障的传播路径有较大可能性逐步偏离原预测传播路径，而按照线路6-11、线路2-3、线路17-18和线路4-14的故障路径进行传播，由此使得模型2中针对原预测故障路径所求解的控制方案不仅在前4个故障传播阶段内无法遏制连锁故障的扩散，使得该多阶段控制方法失效，甚至按照该控制方案实施控制措施会加速连锁故障的恶性演化。

3.3　控制因子对阻断控制结果的影响

如果在传播路径控制的连锁故障多阶段阻断中改变各阶段非故障路径线路的潮流越限控制力度，即将约束条件式(8)中控制因子γ_2修改为1，则将该模型记为模型3。求解模型3，并与模型1的结果进行比较，具体如表5所示。

表5　工况1的不同控制策略的比较

Table 5　Comparison of different control strategies in Condition 1

模型	失负荷量 / MW	失负荷风险	目标函数
1	724.58	12.10	1 825.4
3	734.55	15.28	2 142.9

从表5可知，采用模型3所求得的控制策略虽然能够保障连锁故障按预测传播路径发展，但是在发电机上 / 下调整量有限的情况下，通常需要损失更多的负荷以满足各阶段非故障路径线路潮流不能越限的强制约束，因此模型3的失负荷风险以及目标函数均高于模型1。

进一步分析输电线路的传输容量缩减为其原始值的90%，线路17-18的传输容量仍为300 MW（工况2），结果如表6所示。

表6　工况2的不同控制策略的比较

Table 6　Comparison of different control strategies in Condition 2

模型	失负荷量 / MW	失负荷风险	目标函数
1	761.53	53.03	6005.17
3	—	—	—

由表6可知，随着线路传输容量裕度进一步降低，采用模型3已无法求解相应的多阶段控制方法。这是因为在该工况下，第二阶段控制中，非故障路径线路13-14无论采用何种控制措施，均无法避免其潮流越限。这一情况符合电力系统在极端运行情况下，针对某线路潮流越限控制时，不可避免地会引起其他线路的潮流过载。因此，在考虑传播路径的连锁故障多阶段控制中适度地松弛非故障路径线路的潮流越限约束，不仅可以求得某特定运行情况下合适的控制策略，并且该策略下的失负荷量、失负荷风险以及目标函数均较低。

此外，对比工况1和工况2的模型1求解结果可得，随着电网运行裕度的降低，针对同一连锁故障传播路径的控制策略中失负荷量、失负荷风险以及目标函数均有不同程度的增长。因此电网规划中在一定的经济约束下需尽可能地提升电网运行裕度，避免出现电网逼近或者处于极限运行的情况。

3.4　IEEE 118节点系统的计算结果

在IEEE 118节点系统分析过程中，设置线路5-8开断为预设初始故障，其余参数设置与IEEE 39节点系统保持一致。

表7给出了在不涉及任何控制措施的情况下，初始故障为线路5-8开断的过载主导型连锁故障传播路径以及各阶段开断线路的故障概率。

由表7可知，由于线路5-8开断为初始预设故障，所以第一阶段故障概率取值为1，同时线路5-8的开断使得线路12-16所承载的潮流由初始运行状

表7 IEEE 118节点系统在无控制措施下连锁故障预测传播路径及故障概率

Table 7 Forecasting propagation path and failure probability of cascading failures for IEEE 118-bus system

故障阶段	开断线路	故障概率	故障阶段	开断线路	故障概率
Stage 1	5-8	1	Stage 3	14-15	1
Stage 2	12-16	0.486	Stage 4	13-15	1

态下的4.70 MW上升至119.24 MW，涨幅近25倍，超过了其100 MW的热稳定容量极限。随着连锁故障路径的演化，流过第三阶段故障线路14-15和第四阶段故障线路13-15的有功功率分别为170.83 MW和320 MW，使得线路故障概率高达1。

在此基础上，采用模型1针对上述连锁故障传播路径进行多阶段控制求解，实施控制措施后连锁故障各阶段故障概率最大的线路及其故障概率如表8所示。

表8 IEEE 118节点系统采用控制措施后各阶段故障概率最大的线路及其故障概率

Table 8 Line with highest failure probability and its failure probability with control measures at each stage for IEEE 118-bus system

故障阶段	开断线路	故障概率	故障阶段	开断线路	故障概率
Stage 1	5-8	1	Stage 3	14-15	0.03
Stage 2	12-16	0.19	Stage 4	13-15	0.01

对比表7和表8可知，采用本文所提模型计算得到的控制措施可在保障连锁故障尽可能地按预测传播路径发展的前提下，有效降低连锁故障各阶段开断线路的故障概率。

4 结论

针对过载主导型连锁故障阻断控制研究，本文从连锁故障传播过程与多阶段控制策略间的交互影响出发，提取了针对预测连锁故障的传播路径控制约束和线路潮流控制力度约束，在此基础上，建立了以各个阶段的期望控制成本和失负荷风险之和最小为目标函数，考虑传播路径的连锁故障多阶段控制模型，讨论了控制模型中分别未考虑传播路径控制约束和线路潮流控制力度约束时求解方案的适用性和有效性。算例分析表明，未考虑传播路径控制约束的模型求解方案可能会使得连锁故障传播路径偏离原预测传播路径，致使针对原预测传播路径的求解方案失效，而未考虑线路潮流控制力度约束的模型求解方案过于保守，甚至在电网极端运行时无法有效求解。因此在多阶段控制模型中上述约束缺一不可，以确保在本文后续故障选择标准下，松弛线路潮流约束的同时仍驱动连锁故障按预测传播路径发展。

当前的研究工作聚焦于已知传播路径的连锁故障多阶段控制，并未考虑在控制过程中连锁故障传播路径线路的动态变化，因此如何针对该问题建立相应的连锁故障动态演化与控制模型，提出对应的模型决策空间降维方法将是下一步的研究重点。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] 汤涌，卜广全，易俊. 印度“7·30”、“7·31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报，2012，32(25)：167-174.
TANG Yong，BU Guangquan，YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31，2012 [J]. Proceedings of the CSEE，2012，32(25)：167-174.

[2] 胡秦然，丁昊晖，陈心宜，等. 美国加州2020年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化，2020，44(24)：11-18.
HU Qinran，DING Haohui，CHEN Xinyi，et al. Analysis on rotating power outage in California，USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems，2020，44(24)：11-18.

[3] 刁塑，刘俊勇，刘友波，等. 考虑电网承载结构的连锁故障模拟与防御策略[J]. 电力自动化设备，2015，35(11)：143-151.
DIAO Su，LIU Junyong，LIU Youbo，et al. Cascading failure simulation and defense strategy considering grid carrying structure[J]. Electric Power Automation Equipment，2015，35(11)：143-151.

[4] 贺庆，郭剑波. 降低大停电事故序列期望值的均衡性控制[J]. 中国电机工程学报，2012，32(4)：65-69，17.
HE Qing，GUO Jianbo. Balance control for decreasing expected value of blackout sequence[J]. Proceedings of the CSEE，2012，32(4)：65-69，17.

[5] 王韶，刘沛铮，董光德，等. 基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型[J]. 电力自动化设备，2016，36(9)：162-168.
WANG Shao，LIU Peizheng，DONG Guangde，et al. Power system cascading failure model based on complex network theory with consideration of corrective control[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(9)：162-168.

[6] 蔡晔，曹一家，谭玉东，等. 基于标准化结构熵的电网结构对连锁故障的影响[J]. 电工技术学报，2015，30(3)：36-43.
CAI Ye，CAO Yijia，TAN Yudong，et al. Influences of power grid structure on cascading failure based on standard structure entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(3)：36-43.

[7] 陈中，朱政光，严俊. 基于安全距离灵敏度的交直流混联系统安全校正策略[J]. 电力自动化设备，2019，39(9)：144-150，165.
CHEN Zhong，ZHU Zhengguang，YAN Jun. Security correction strategy of AC/DC hybrid system based on security distance sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(9)：144-150，165.

[8] 任建文，魏俊姣，谷雨峰. 基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J]. 电力自动化设备，2016，36(7)：53-59.
REN Jianwen，WEI Junjiao，GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(7)：53-59.

[9] ALSAC O，STOTT B. Optimal load flow with steady-state security[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems，1974，93(3)：745-751.

[10] DVORKIN Y，HENNEAUX P，KIRSCHEN D S，et al. Optimi-

zing primary response in preventive security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 12(1): 1-10.
[11] 傅旭. 电力系统静态安全混合控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 124-130.
FU Xu. Hybrid control of power system static security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 124-130.
[12] FU W, MCCALLEY J D. Risk based optimal power flow[C]// IEEE Porto Power Tech. Porto, Portugal: IEEE, 2001: 238-243.
[13] 丁明，钱宇骋，张晶晶，等. 基于风险评估的电力系统连锁故障协调控制模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 1-8.
DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing, et al. Coordinated control model of power system cascading failures based on risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 1-8.
[14] 张晶晶，杨洋，李小燕，等. 考虑安全和经济的电力系统连锁故障协调控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4784-4791, 4983.
ZHANG Jingjing, YANG Yang, LI Xiaoyan, et al. Coordinated control model of power system cascading failure considering security and economy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4784-4791, 4983.
[15] 甘国晓，耿光超，高波，等. 考虑线路停运概率的电力系统连锁故障阻断控制[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 266-272.
GAN Guoxiao, GENG Guangchao, GAO Bo, et al. Blocking control of power system cascading failures considering line outages probability[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 266-272.
[16] 孙元章，程林，刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12.
SUN Yuanzhang, CHENG Lin, LIU Haitao. Power system operating reliability evaluation based on real-time operating state [J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.
[17] 张海翔，吕飞鹏. 基于连锁故障序列分析的电网脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 32-38.
ZHANG Haixiang, LÜ Feipeng. Vulnerability evaluation of power grid based on the analysis of cascading failure sequence [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 32-38.
[18] 张伯明，陈寿孙，严正. 高等电力网络分析[M]. 北京：清华大学出版社, 2007: 208-217.
[19] 薛禹胜，李威，D. J. Hill. 暂态稳定混合控制的优化(一)单一失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 6-10.
XUE Yusheng, LI Wei, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability part one: for cases with a unique unstable mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 6-10.
[20] CARRERAS B A, LYNCH V E, SACHTJEN M L, et al. Modeling blackout dynamics in power transmission networks with simple structure[C]//Proceedings of 34th IEEE Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii, USA: IEEE, 2001: 719-727.

作者简介：

刘雨濛

刘雨濛(1992—)，女，湖北武汉人，博士研究生，主要研究方向为电力系统稳定和控制(**E-mail**：lym_yomand@163.com)；

顾雪平(1964—)，男，河北石家庄人，教授，博士，主要研究方向为电力系统分析、稳定和控制(**E-mail**：xpgu@necpu.edu.cn)；

王　涛(1976—)，男，陕西户县人，副教授，博士，主要研究方向为电力系统安全防御和恢复控制、智能技术在电力系统中的应用(**E-mail**：wtwxx@126.com)。

(**编辑　李玮**)

Multi-stage blocking control of power system cascading failures considering propagation path

LIU Yumeng, GU Xueping, WANG Tao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Carrying out researches on multi-stage blocking control of cascading failures has important application values for the safe and stable operation of power system and upgrading of power grid. The propagation process of cascading failures caused by overload is briefly described, and the interaction effects between propagation paths of this type of cascading failures and blocking control strategies are analyzed. On this basis, in view of cascading failures considering propagation path, the researches on multi-stage blocking control are carried on, the outage probability constraints of lines in fault / non-fault path and the constraints of power flow control strength are extracted. Then, taking the minimum of the sum of expected control cost and the risk of load loss as the objective, the multi-stage control model considering cascading failures of propagation path is established. Finally, numerical results indicate that the control strategies generated by the proposed model can effectively reduce the fault probability of lines in fault path while driving the cascading failures follow the predicted propagation path, which provides an important reference for the defense decision of cascading failures.

Key words: electric power systems; cascading failures; propagation path; multi-stage blocking control; operation risk

附录 A

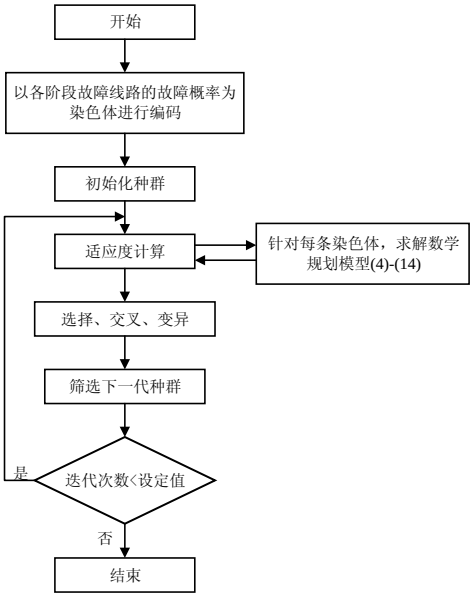

图 A1 模型求解流程图

Fig.A1 Flowchart of solving model

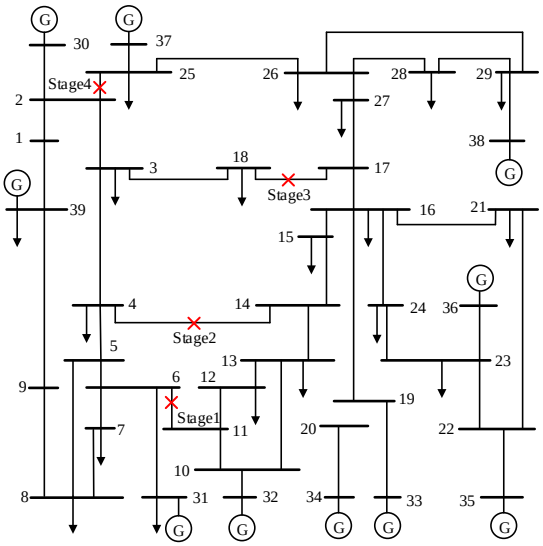

图 A2 IEEE 39 节点系统

Fig.A2 IEEE 39-bus system

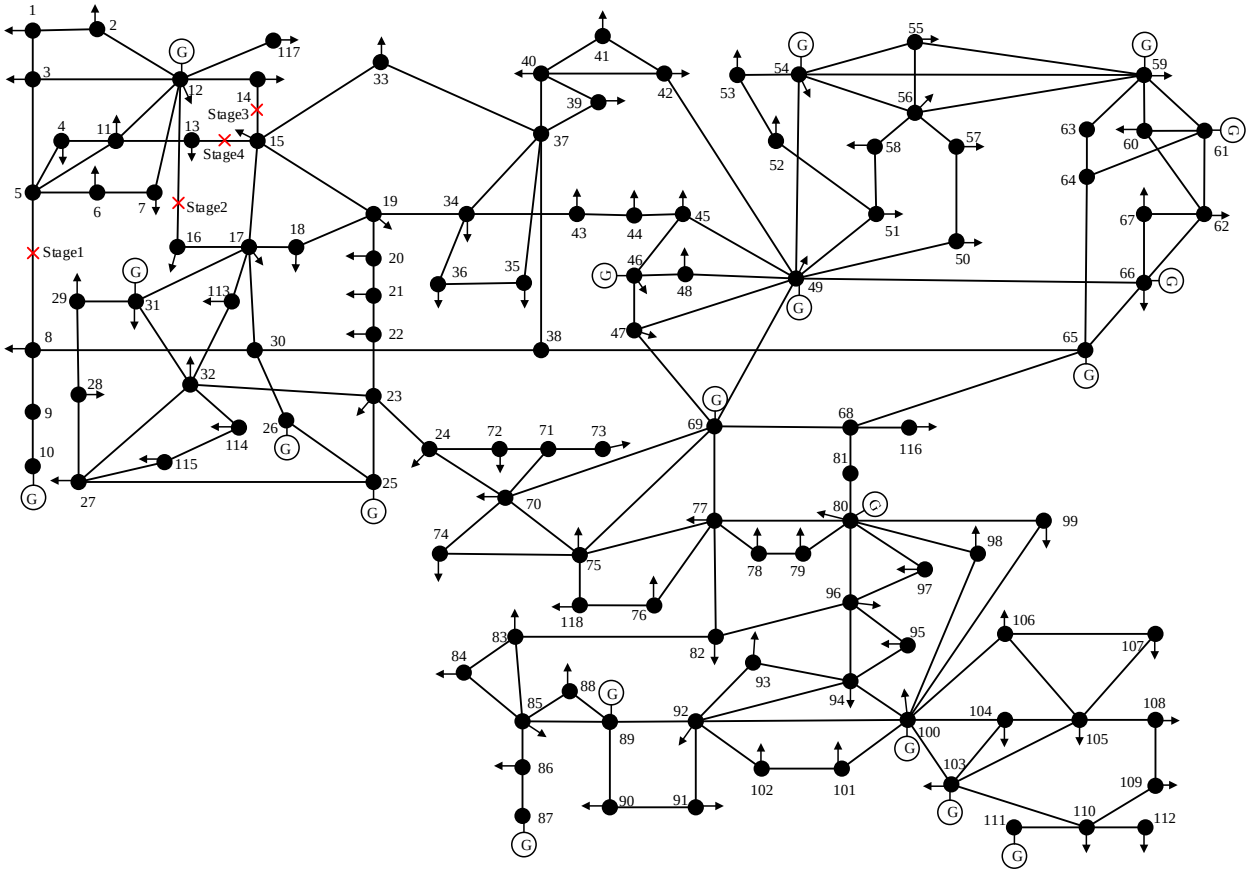

图 A3 IEEE 118 节点系统

Fig.A3 IEEE 118-bus system

表 A1 多阶段阻断控制方案

Table A1 Multi-stage blocking control schemes

控制方案	发电机有功出力/MW										切负荷量/MW
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
初始状态	660.85	646.00	660.85	652.00	508.00	660.85	580.00	564.00	660.85	660.85	-
Stage 1	590.25	646.00	552.10	637.60	508.00	557.80	580.00	564.00	790.60	825.85	2.04(节点 4)
Stage 2	482.51	646.00	443.35	560.75	508.00	454.75	580.00	564.00	790.60	990.85	231.39(节点 3 切 15.94/节点 4 切 57.45/节点 18 切 158)
Stage 3	326.51	646.00	346.83	560.75	508.00	454.75	580.00	564.00	790.60	937.03	306.33(节点 3 切 306.06/节点 4 切 0.27)
Stage 4	482.51	646.00	345.24	462.95	508.00	351.70	493.00	479.40	660.85	1100.00	184.82(节点 4 切 175.62/节点 31 切 9.20)