

分段迭代式线路过载保护控制协调优化方法

王紫琪,李 军,陈 炜,肖智宏,张祥龙,申洪明

(国网经济技术研究院有限公司,北京 102209)

摘要:线路过载情况下,保护的不当动作及保护控制措施的不合理配合容易扩大事故规模,造成严重的后果。针对该问题,提出一种分段迭代式线路过载保护控制协调优化方法,以实现保护、控制措施的深度交互配合。所提方法对线路热稳定极限运行时间进行分段,并针对当前时段构建相应的保护控制协调优化模型。同时,依据控制措施分段投运情况,滚动计算线路功率值,调整过负荷保护动作时间,进而实现保护控制措施的迭代优化。所提方法有利于延长过负荷保护动作时间,扩大控制资源范围,获得更好的过载调整效果。仿真算例验证了所提方法的有效性。

关键词:紧急控制;过负荷保护;线路过载;连锁故障;分段迭代;潮流追踪

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102037

0 引言

电力系统负荷需求量的增长,特高压输电工程的逐步推进,电网互联程度的不断提升,均给系统安全稳定运行带来了前所未有的挑战,也对保护控制措施提出了更高的要求。在大规模互联电网中,局部故障很容易通过连锁反应迅速发展成大规模事故。根据对几起重大连锁事故^[1-2]的分析可知,当个别元件因故障退出运行时,继电保护装置的不正确动作及控制措施的不合理配合将进一步引起潮流的大范围转移,导致线路相继过载停运,最终引发严重的后果^[3-5]。

连锁故障的发生揭示了故障演化过程中电力系统抵抗风险的漏洞。过负荷保护以保护电气设备为目标,在过载情况下直接动作切除线路,这种保护形式并未从系统安全的角度进行防御,可能造成故障态势的严重化,对更大范围的系统性事故起到推波助澜的作用。紧急控制措施通常采用灵敏度法^[6-10]或其他优化类方法^[11-13]确定切机、切负荷等有功控制量。文献[9]建立功率转移约束条件,并以节点的功率灵敏度为基础,评估不同子网功率转移给线路带来的影响,进而确定功率控制措施;文献[10]基于暂态稳定约束条件,采用有限元正交配置的离散微分代数方程,对不同控制量的灵敏度进行分析;文献[13]以负荷转移量最小为目标,在故障后形成的孤岛子系统中确定负荷削减区域,并进行负荷削减。在保护与控制措施配合方面,现有研究多以线路过负荷极限运行时间为依据,分别形成保护动作方案和控制策略^[14]。但究其根本,保护与控制措施依旧彼此分离,严重缺乏协调配合。

保护控制措施实施的最终目的是通过保护控制协调配合,使线路过载情况消失,维持电力系统安全

稳定运行,既要避免线路长时间过载运行,也要避免事故的进一步加剧。据此,本文提出一种分段迭代式线路过载保护控制协调优化方法,依据过载线路的功率情况,滚动计算线路热稳定极限运行时间,对其进行分段并形成相应的保护控制迭代优化模型。通过对优化模型进行求解计算,得到保护控制措施的协调配合方案。本文所提方法有利于延长线路过负荷保护动作时间,扩大控制资源范围,有机会降低负荷损失量,获得更好的过载调整效果。

1 分段式保护控制协调原理

线路过载保护控制措施常见的协调方案为:计算线路热稳定极限运行时间,据此确定线路过负荷保护动作时间;在保护动作前,依据离线策略表或优化计算得到线路过载紧急功率控制措施;投运紧急功率控制措施,使线路功率回到安全范围内。其中,线路热稳定极限运行时间^[15]指线路在过负荷情况下从当前运行温度升高到最高可承受温度的时间。相比于传统过流判据,基于热稳定原理的判据更侧重于对线路温度及热载荷能力的分析,不仅考虑了线路电流(功率)值,还考虑了导线比热容、对流散热量等因素的影响^[16]。线路热稳定极限运行时间可充分挖掘过负荷保护动作时延潜力,受到了专家学者的广泛认可^[14-16]。

电力系统中发电机、负荷等可控节点众多,且发电机、负荷功率输入/汲取量的调整速度有快有慢。过载线路功率也随着控制措施的先后投入而改变。因此,可对线路热稳定极限运行时间进行分段,建立分段时间节点,并在各时间段的控制措施投运后,滚动延长线路热稳定极限运行时间,实现保护控制措施的迭代优化。分段式保护控制协调流程如附录中图A1所示,具体步骤如下。

(1)线路发生过载时,分段式保护控制协调流程

启动,令 $n=1$ 。

(2)依据线路功率值,计算线路热稳定极限运行时间 $T_{\text{overload}(n-1)}$ 。调整过负荷保护动作时间至 $T_{\text{overload}(n-1)}$,并将 $T_n(T_0=0)$ 至 $T_{\text{overload}(n-1)}$ 分段,如图1所示(图中,以 $n=3$ 的情况为例)。

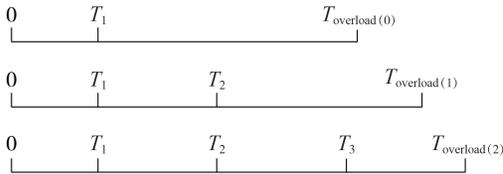


图1 时间分段示意图

Fig.1 Schematic diagram of time segmentation

(3)确定 $[0, T_{n-1})$ 时间段内系统仍存在的可调控资源及 $[T_{n-1}, T_n)$ 时间段内的可调控资源,并进行优化计算。

(4)按照当前控制措施进行调整,设控制措施在 T_n 结束时刻投运完毕,判断过载线路的功率是否回到安全范围内,若已回到安全范围内则流程结束;否则令 $n=n+1$,返回步骤(2),直至线路功率恢复正常范围。

分段式保护控制协调流程应注意以下2点。

(1)过负荷保护动作时间不仅受功率变化、线路热稳定平衡、弧垂限制等因素的影响,还受上级过负荷保护动作时间限制。每次调整线路过负荷保护动作时间时,若上级过负荷保护启动,则取本线路热稳定极限运行时间与上级线路/变压器过负荷保护动作时间中的较小值作为本线路过负荷保护动作时间及分段基础,以避免保护之间时序配合不当造成事故规模扩大。

(2)控制措施在各时段结束时刻投运完毕,因此,需根据控制措施投运前后的线路功率值,确定功率变化情况下的线路热稳定极限运行时间。

本文所提分段式保护控制协调思路既可用于离线模式下保护控制协调策略的制定,也可在过载发生后立即执行协调计算流程,并得到全时段保护控制方案。本文的思路用于离线方案制定时,需计算线路功率,并估算线路热稳定极限运行时间,通过迭代优化得到离线模式下的保护控制策略表;用于在线方案制定时,需要在过载发生后立即执行覆盖全时段的滚动优化计算流程,得到保护控制协调策略,并在各时段投运相应的保护控制措施。

2 基于潮流追踪算法的保护控制协调计算

本文以潮流追踪算法为基础,以负荷损失量最小为目标,对线路过载情况下的保护控制协调优化过程进行求解计算,保护控制协调计算流程如附录中图A2所示,具体步骤如下。

(1)线路发生过载时,计算当前情况下过载线路

的热稳定极限运行时间 T_{overload} 。调整线路过负荷保护动作时间至 T_{overload} ,并判断在该时间内可调的发电机、负荷节点及节点调整量。以图2为例进行说明,图中 P 为节点功率。 T_{overload} 时间内,发电机节点1、发电机节点3、负荷节点 n 、负荷节点 $n+1$ 可响应,其中发电机节点1未达到其最大调整量;发电机节点2不在该时间可控节点范围内。

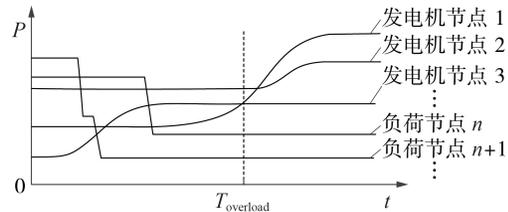


图2 节点功率调整量及响应时间

Fig.2 Value and response time of power adjustment at nodes

(2)基于潮流追踪算法剥离全网源荷功率输送路径,直观网络中的功率构成。潮流追踪算法主要基于比例分配原则,从发电机节点出发,顺潮流流向依次在各个节点进行潮流分配直至负荷侧,从而获得网络中的功率传输路径和分布情况,具体计算方法在文献[14,17]中有详细介绍,此处不再赘述。潮流追踪算法存在一定的不足,其对有功、无功功率进行解耦处理,忽略了系统有功、无功功率的交互影响,功率追踪结果较为粗略。但其物理意义明确,追踪过程清晰直观,被广泛应用于电力市场节点电价计算、网损分摊、输电容量裕度评估、系统稳定控制等。

(3)计算使线路功率回到正常范围内的最小切负荷量。以负荷损失量最小为目标,以本节的步骤(2)得到的功率输送路径为基础调整单位,此时目标函数可表示为^[14]:

$$\min S(\Delta P_w) = \sum_{j \in L_{\text{load}}} \left(\left| P_{L,j} \right| - \left| P_{L,j} + \sum_{n \in N} \Delta P_n^{L,j} \right| \right) \quad w \in \varphi \quad (1)$$

其中, $S(\cdot)$ 为负荷损失总量函数; ΔP_w 为路径 w 的功率调整量; L_{load} 为网络中的负荷集合; φ 为网络中的路径集合; $P_{L,j}$ 为负荷 j 的初始功率; $\Delta P_n^{L,j}$ 为负荷 j 在路径 n 中的发电调整量; N 为所有包含负荷 j 的路径集合。

路径的优化调整应在满足发电机、负荷、线路功率约束的前提下进行。故以发电机、负荷、输电线路的有功功率上下限为约束,如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} + \sum_{m \in M} \Delta P_m^{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & i \in L_{\text{gene}} \\ P_{L,j}^{\min} \leq P_{L,j} + \sum_{n \in N} \Delta P_n^{L,j} \leq P_{L,j}^{\max} & j \in L_{\text{load}} \\ P_{Tk}^{\min} \leq P_{Tk} + \sum_{q \in Q} \Delta P_q^{Tk} \leq P_{Tk}^{\max} & k \in L_{\text{line}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_{Gi} 为发电机节点 i 的初始功率; ΔP_m^{Gi} 为发电机节点 i 在路径 m 中的调整量; M 为所有包含发电机节点 i 的路径集合; P_{Gi}^{\max} 和 P_{Gi}^{\min} 分别为线路热稳定极限运行时间 T_{overload} 内, 发电机 i 的有功功率的上限和下限; L_{gene} 为网络中的发电机集合; P_{Lj}^{\max} 和 P_{Lj}^{\min} 分别为线路热稳定极限运行时间 T_{overload} 内, 负荷 j 的有功功率上限和下限, 一般情况下 $P_{Lj}^{\min} = 0$; P_{Tk} 为线路 k 的初始功率; ΔP_q^{Tk} 为线路 k 在路径 q 中的发电调整量; Q 为所有包含线路 k 的路径集合; P_{Tk}^{\max} 和 P_{Tk}^{\min} 分别为线路 k 可输送有功功率的上限和下限; L_{line} 为网络中的线路集合。

根据式(1)和式(2)计算目标函数值, 即最小切负荷量, 并得到各条路径的功率调整量 ΔP_w 。

(4) 根据求解得到的可控制资源的功率调整量, 确定各发电机节点和负荷节点的控制量即控制措施为:

$$\Delta P_{Gi} = \sum_{m \in M} \Delta P_m^{Gi} \quad i \in L_{\text{gene}} \quad (3)$$

$$\Delta P_{Lj} = \sum_{n \in N} \Delta P_n^{Lj} \quad j \in L_{\text{load}} \quad (4)$$

其中, ΔP_{Gi} 、 ΔP_{Lj} 分别为发电机节点 i 、负荷节点 j 的控制量。由上述计算结果即可确定当前发电机节点和负荷节点的控制措施。

3 分段迭代式保护控制协调优化方法

本文基于分段式保护控制协调原理和协调计算方法, 对线路过载情况下的保护控制配合过程进行分段迭代优化, 拓展线路过载运行时间, 扩大可控制资源范围, 减小系统负荷损失量。以线路 x 发生过载为例, 对分段迭代式保护控制协调优化方法的步骤进行详细说明。

(1) 分段协调优化过程判断。依据第2节得到最小负荷损失量, 判断是否进行分段协调过程: 当最小负荷损失量为0时, 可直接投运当前保护控制措施, 保护控制协调过程结束; 当最小负荷损失量不为0时, 设最小负荷损失量为 P_{load} , 根据过载线路 x 的热稳定极限运行时间 T_{overload} 内系统中的可控制资源, 对过载线路 x 上的过负荷保护装置和可控制资源进行分段协调优化。调整线路过负荷保护动作时间至 T_{overload} , 并将时间 T_{overload} 分为 z 段, 考虑各时间段内可协调的控制变量进行分轮次优化。

(2) 第1轮保护控制协调优化。

寻找 $0 \sim T_1$ ($T_1 = T_{\text{overload}}/z$) 时间段内的可控制资源, 如图3所示。以减小过载线路上的功率为目标, 此时目标函数可表示为:

$$\min G(\Delta P_w) = P_{Tx} + \sum_{q \in X} \Delta P_q^{Tx} \quad w \in \varphi \quad (5)$$

其中, $G(\cdot)$ 为线路功率函数; P_{Tx} 为线路 x 的初始功率; ΔP_q 为路径 q 的功率调整量; ΔP_q^{Tx} 为线路 x 在路径

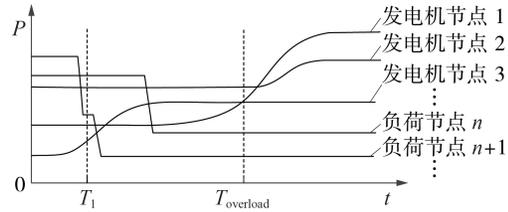


图3 第1轮节点功率调整量及响应时间示意图

Fig.3 Value and response time of power adjustment at nodes in first round

q 中的功率调整量; X 为所有包含线路 x 的路径集合。

约束条件为:

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min-1} \leq P_{Gi} + \sum_{m \in M} \Delta P_m^{Gi} \leq P_{Gi}^{\max-1} & i \in L_{\text{gene}} \\ P_{Lj}^{\min-1} \leq P_{Lj} + \sum_{n \in N} \Delta P_n^{Lj} \leq P_{Lj}^{\max-1} & j \in L_{\text{load}} \\ P_{Tk}^{\min} \leq P_{Tk} + \sum_{q \in Q} \Delta P_q^{Tk} \leq P_{Tk}^{\max} & k \in L_{\text{line}^*} \\ \sum_{j \in L_{\text{load}}} \left(|P_{Lj}| - \left| P_{Lj} + \sum_{n \in N} \Delta P_n^{Lj} \right| \right) \leq P_{\text{load}}/z \end{cases} \quad (6)$$

其中, $P_{Gi}^{\max-1}$ 和 $P_{Gi}^{\min-1}$ 分别为第1轮 $0 \sim T_1$ 时间段内, 发电机节点 i 的有功功率调整的上限和下限; $P_{Lj}^{\max-1}$ 和 $P_{Lj}^{\min-1}$ 分别为 $0 \sim T_1$ 时间段内, 负荷 j 的有功功率调整的上限和下限; L_{line^*} 为网络中除过载线路 x 外的所有线路集合; 式(6)中第4个公式表示本轮次负荷损失总量约束。

通过上述计算得到目标函数值及各路径功率调整量。根据求解得到的路径功率调整值, 确定各发电机节点和负荷节点的控制量, 计算方法同式(3)、式(4)。根据目标函数值, 判断过载线路功率是否回到安全范围内。若过载线路功率回到安全范围内, 则按照当前控制方法进行功率调整, 流程结束; 若线路仍然过载, 则按当前控制方法进行功率调整, 并进入步骤(3)。

(3) 第2轮保护控制协调优化。

本文考虑在 T_1 结束时刻投运控制措施并完成的情况。基于线路功率在控制措施下的变化情况, 计算得新的热稳定极限运行时间 $T_{\text{overload}(1)} = T_1 + T_{\text{new}(1)}$, 调整线路过负荷保护动作时间至 $T_{\text{overload}(1)}$ 。寻找 $0 \sim T_2$ ($T_2 = T_{\text{overload}}/z + T_{\text{new}(1)} / (z-1)$, $T_{\text{new}(1)}$ 为当前控制措施执行后的线路热稳定极限运行时间) 时间段内, 系统中仍存在的可控制资源 ($0 \sim T_1$ 时间段内仍留存的可控制资源及 $T_1 \sim T_2$ 时间段内的可控制资源), 如图4所示。

参照步骤(2)进行协调优化计算: 目标函数同式(5); $0 \sim T_2$ 时间段内系统中仍存在可控制资源, 则约束条件(式(6))中的 $P_{Gi}^{\max-1}$ 、 $P_{Gi}^{\min-1}$ 、 $P_{Lj}^{\max-1}$ 、 $P_{Lj}^{\min-1}$ 分别调整为 $P_{Gi}^{\max-2}$ 、 $P_{Gi}^{\min-2}$ 、 $P_{Lj}^{\max-2}$ 、 $P_{Lj}^{\min-2}$, 即第2轮中对应的发电机和负荷有功调整的上、下限。

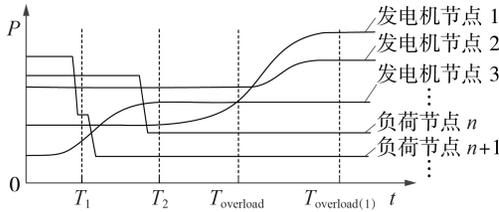


图 4 第 2 轮节点功率调整量及响应时间示意图

Fig.4 Value and response time of power adjustment at nodes in second round

通过上述计算,判断当前得到的目标函数值是否可以使过载线路的功率回到安全范围内。若过载线路功率回到安全范围内,则按当前控制方法进行功率调整,流程结束;若线路仍然过载,则按当前控制方法调整后进入步骤(4)。

(4)重复步骤(2)、(3),直至第 z 轮次(即最后一轮次)。寻找 $T_z = T_{\text{overload}}/z + T_{\text{new}(1)}/(z-1) + T_{\text{new}(2)}/(z-2) + \dots + T_{\text{new}(z-1)}$ 时间内系统中仍存在的可控制资源。此时目标函数、约束条件分别与式(1)、式(2)一致,即以线路功率回到正常范围内为约束,对剩余控制资源进行优化,得到最后一轮次的控制措施,保证系统回到安全运行范围内。

分段迭代式保护控制协调优化计算过程中,也需注意保护动作时间与上级线路/变压器过负荷保护动作时间的协调配合,协调方法与分段协调原理相同。

4 仿真分析

4.1 14节点系统算例分析

以图 5 所示系统为例,证明分段迭代式线路过载保护控制协调优化方法的正确性。系统中发电机节点的有功出力、负荷节点吸收的有功功率分别如表 1 和表 2 所示。表中,有功出力、最大有功出力、最小有功出力、吸收有功均为标么值,后同。

某一时刻,线路 T_4 意外断线,线路 T_5 的功率上升超限,各线路上的有功功率及最大承载功率如表 3 所示。表中,有功功率、最大承载功率均为标么值,后同。

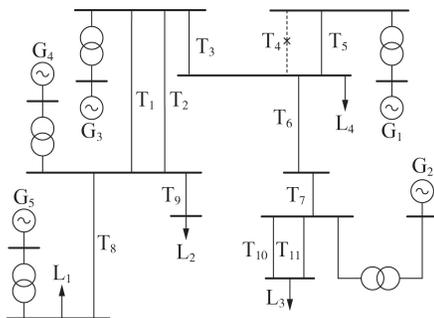


图 5 14 节点系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of 14-bus system

表 1 14 节点系统中发电机节点的有功出力

Table 1 Power output of generator nodes in 14-bus system

发电机节点	有功出力	最大有功出力	最小有功出力
G_1	8.10	8.10	0
G_2	3.50	5.50	0
G_3	1.55	3.15	0
G_4	2.50	2.50	0
G_5	4.80	4.80	0

表 2 14 节点系统中负荷节点吸收的有功功率

Table 2 Power absorption of load nodes in 14-bus system

负荷节点	吸收有功	最大切除比例 / %	负荷节点	吸收有功	最大切除比例 / %
L_1	7.04	100	L_3	4.80	100
L_2	3.22	100	L_4	5.39	100

表 3 14 节点系统中线路有功功率及最大承载功率

Table 3 Active power and maximum power capacity of transmission lines in 14-bus system

线路	有功功率	最大承载功率	线路	有功功率	最大承载功率
T_1	1.48	2.11	T_7	1.30	1.85
T_2	1.48	2.11	T_8	2.24	3.20
T_3	1.41	2.01	T_9	3.22	4.60
T_4	—	—	T_{10}	2.40	3.43
T_5	8.10	7.72	T_{11}	2.40	3.43
T_6	1.30	1.85			

若功率恢复至安全范围内,则线路 T_5 的有功功率应减少 0.38 p.u.。当前情况下,线路 T_5 的热稳定极限运行时间 $T_{\text{overload}}=10$ s。对系统中可采用的紧急控制措施进行分析。本文对控制措施进行简化处理,即认为各节点功率注入(吸收)量连续可调,将控制节点及控制量划入不同时间段,各发电机、负荷节点时段功率调整量如表 4 所示。表中,发电机节点功率调整量为标么值,后同。

表 4 14 节点系统中的节点功率调整量及时间

Table 4 Value and response time of power adjustments at nodes in 14-bus system

时间 / s	发电机节点功率调整量					L_1-L_4 切除比例 / %
	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	
[0, 5)	-8.1~0	-3.5~0	-1.55~0	-2.5~0	-4.8~0	-100
[5, 10)	-8.1~0	-3.5~0	-1.55~0	-2.5~0	-4.8~0	-100
[10, 15)	-8.1~0	-3.5~2	-1.55~0	-2.5~0	-4.8~0	-100
[15, 60)	-8.1~0	-3.5~2	-1.55~0	-2.5~0	-4.8~0	-100
[60, 600]	-8.1~0	-3.5~2	-1.55~0	-2.5~0	-4.8~0	-100

(1)最小负荷损失量计算。

根据热稳定极限运行时间 T_{overload} ,选取可控制资源。采用潮流追踪算法,剥离网络中发电机节点到各负荷节点的功率输送路径,确定网络功率构成。功率输送路径追踪结果如表 5 所示。

设路径 $w(w=1, 2, \dots, 16)$ 的功率调整量为 ΔP_w 。

表5 14节点系统的功率输送路径

Table 5 Power transmission paths in 14-bus system

路径	路径单元	路径	路径单元
1	G ₁ -T ₅ -T ₃ -T ₁ -T ₈ -L ₁	9	G ₂ -T ₁₁ -L ₃
2	G ₁ -T ₅ -T ₃ -T ₂ -T ₈ -L ₁	10	G ₃ -T ₁ -T ₈ -L ₁
3	G ₁ -T ₅ -T ₃ -T ₁ -T ₉ -L ₂	11	G ₃ -T ₂ -T ₈ -L ₁
4	G ₁ -T ₅ -T ₃ -T ₂ -T ₉ -L ₂	12	G ₃ -T ₁ -T ₉ -L ₂
5	G ₁ -T ₅ -T ₆ -T ₇ -T ₁₀ -L ₃	13	G ₃ -T ₂ -T ₉ -L ₂
6	G ₁ -T ₅ -T ₆ -T ₇ -T ₁₁ -L ₃	14	G ₄ -T ₈ -L ₁
7	G ₁ -T ₅ -L ₄	15	G ₄ -T ₉ -L ₂
8	G ₂ -T ₁₀ -L ₃	16	G ₅ -L ₁

基于第2节步骤(3),以负荷损失量最小为目标,以功率输送路径为基础调整单位建立优化模型,调用MATLAB中的linprog函数求解模型。由计算结果可得,使线路T₅的功率回到安全范围内的最小切负荷量为0.38 p.u.。

(2)分段优化协调计算。

对过载线路T₅上的过负荷保护装置和系统中的可调控资源进行分段协调优化。取 $z=2$,即进行2轮优化协调计算。

a. 第1轮保护控制协调优化。将极限热稳定运行时间 T_{overload} 分为2份,通过表4数据,确定0~5 s ($T_{\text{overload}}/z=10/2=5$ (s))时间段内的可调控资源。以降低过载线路功率为目标,以发电机、负荷节点5 s内的功率调整量、其他线路输送功率限度值、负荷损失总量限制为约束条件,建立优化模型。调用linprog函数对模型进行求解。经计算可得当前线路T₅调整后的传输功率为7.91 p.u.,仍然过载,则第1轮保护控制协调优化措施为:L₄切除0.19 p.u.,G₁切除0.19 p.u.。

b. 第2轮(最后一个轮次)保护控制协调优化。投运并完成5 s结束时刻的控制措施后,线路T₅的功率下降至7.91 p.u.,得到新的极限热稳定运行时间为 $T_{\text{overload}}/z+T_{\text{overload}(1)}=10/2+10=15$ (s),调整线路过负荷保护动作时间至15 s。

确定0~15 s时间段内电力系统网络中仍然存在的可调控资源,列写式(1)所示的目标函数。基于发电机、负荷节点在该时间段内仍然存在的功率调整量以及线路输送功率上、下限列写约束条件。调用linprog函数对上述模型进行求解,经计算可得到本轮次负荷切除量为0,则第2轮控制协调优化措施为:G₁功率下调0.19 p.u.,G₂功率上调0.19 p.u.,T₅功率下降至7.72 p.u.,电力系统安全运行。

4.2 环网系统分析

将本文所提分段迭代式线路过载保护控制协调优化方法应用在图6所示的环网系统中,系统中发电机节点的有功出力及负荷吸收的有功功率分别如表6、7所示。

某一时刻,线路T₁意外断线,线路T₄的功率上

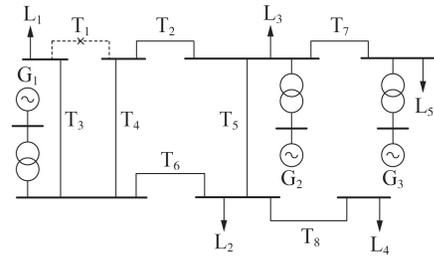


图6 环网系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of ring system

表6 环网系统中发电机节点的有功出力

Table 6 Power output of generator nodes in ring system

发电机节点	有功出力	最大有功出力	最小有功出力
G ₁	0.65	1.20	0
G ₂	2.30	2.50	0
G ₃	1.65	1.65	0

表7 环网系统中负荷节点吸收的有功功率

Table 7 Power absorption of load nodes in ring system

负荷节点	吸收有功	最大切除比例/%	负荷节点	吸收有功	最大切除比例/%
L ₁	2.10	100	L ₄	0.30	100
L ₂	0.55	100	L ₅	0.90	100
L ₃	0.75	100			

升越限,各线路上的有功功率及最大承载功率如表8所示。

表8 环网系统中线路有功功率及最大承载功率

Table 8 Active power and maximum power capacity of transmission lines in ring system

线路	有功功率	最大承载功率	线路	有功功率	最大承载功率
T ₁	—	—	T ₅	1.40	1.50
T ₂	0.90	1.50	T ₆	0.55	1.12
T ₃	2.10	2.50	T ₇	0.75	1.00
T ₄	0.90	0.70	T ₈	0.30	0.50

若线路T₄开断,则将进一步引发潮流转移,造成线路T₅的连锁过载。若使功率恢复至正常运行状态范围内,则线路T₄应减少0.2 p.u.的功率。当前情况下,线路T₄的极限热稳定运行时间 $T_{\text{overload}}=10$ s。各发电机节点功率调整量、负荷节点切除比例及对应调整时间如表9所示。

表9 环网系统中的节点功率调整量及时间

Table 9 Value and response time of power adjustments at nodes in ring system

时间/s	发电机节点功率调整量			L ₁ —L ₅ 切除比例/%
	G ₁	G ₂	G ₃	
[0,5)	-0.65~0	-1~0	-1.65~0	-100
[5,10)	-0.65~0	-1~0	-1.65~0	-100
[10,15)	-0.65~0.25	-1~0	-1.65~0	-100
[15,60)	-0.65~0.45	-2.3~0	-1.65~0	-100
[60,600]	-0.65~0.55	-2.3~0	-1.65~0	-100

经保护控制优化计算后,产生负荷损失0.322 p.u.,需采用分段迭代式保护控制优化协调方法进行计算。取 $z=2$,即进行2轮优化协调计算。第1轮计算结果为:切负荷量为0.161 p.u., G_2 功率下调0.161 p.u., L_1 切除0.161 p.u.;线路热稳定极限运行时间延长至15 s。第2轮次计算结果为:负荷损失量为0, G_2 功率下调0.25 p.u., G_1 功率上调0.25 p.u.。经2轮控制优化后,线路功率回到安全范围内,总负荷损失量为0.161 p.u.。

4.3 算例对比

将本文所提方法与传统过载保护控制协调方法进行对比。将文献[14,17]中的方法用于4.1和4.2节所示算例中,计算得到的切负荷量如表10所示。表中,负荷切除量为标么值。

表10 不同方法的切负荷量计算结果
Table 10 Calculation results of load shedding with different methods

方法	负荷切除量	
	14节点系统	环网系统
文献[14]方法	0.38	0.322
文献[17]方法	0.38	0.322
本文方法	0.19	0.161

文献[14]建立双层优化目标,在最小负荷损失量基础上优化线路上的功率分布。文献[17]利用潮流追踪算法,通过比例切除方案确定负荷切除节点及切除量。这2种方法均未考虑控制量先后投入情况,未根据线路功率变化滚动调整过负荷保护动作时间。与上述2种方法相比,本文所提方法可有效延长线路过负荷保护动作时间,为紧急控制措施争取更多时间裕量,有效扩大控制措施范围,降低负荷损失量。

5 结论

本文所提出的分段迭代式线路过载保护控制协调优化方法,对线路过载情况下的保护控制措施及配合策略做出重要改进,其特点在于:对线路过负荷保护时间进行分段,形成相应的保护控制迭代优化模型,同时依据控制措施投运情况,滚动实现保护控制措施的优化计算。由于优化计算过程时间很短,而控制措施动作时间较长,为保证控制措施制定及投入的及时性,本文所提方法可用于离线保护控制协调策略制定,或在过载发生后,即刻执行计算流程,并得到全时段保护控制方案。下一步研究工作将包括分段数及各段时长的微分及优化制定、控制措施投运时间的细化分析、线路热稳定极限运行时间的准确计算,及考虑上述因素的保护控制耦合措施分析。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] CHEN Lei, YUE Dong, DOU Chunxia, et al. Robustness of cyber-physical power systems in cascading failure: survival of interdependent clusters [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114: 1-12.
- [2] HU Ping, FAN Wenli. Mitigation strategy against cascading failures considering vulnerable transmission line in power grid [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 540: 1-9.
- [3] 何晓峰,黎寿涛,夏成军,等.基于OPA连锁故障模型的电力系统风险评估[J].南方电网技术,2019,13(10):31-38.
HE Xiaofeng, LI Shoutao, XIA Chengjun, et al. Risk assessment of power system based on OPA cascading failure model [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 31-38.
- [4] 董新洲,汤涌,卜广全,等.大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3107-3119.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [5] 刘挺坚,刘友波,刁塑,等.连锁故障中负荷损失数值特征的非参联分析[J].电力自动化设备,2018,38(7):148-154,161.
LIU Tingjian, LIU Youbo, DIAO Su, et al. Nonparametric correlation analysis of numerical feature for load loss in cascading failure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 148-154, 161.
- [6] 徐岩,邹静.基于直流潮流和虚拟母线的多控制节点防连锁过流跳闸策略[J].电工技术学报,2015,30(13):77-86.
XU Yan, ZHI Jing. A multi control-node emergency control strategy based on dc power flow and virtual bus [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 77-86.
- [7] 徐岩,邹静,樊世通.基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法[J].电力自动化设备,2017,37(1):118-123.
XU Yan, ZHI Jing, FAN Shitong. Line overload emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 118-123.
- [8] 孙大雁,周海强,熊浩清,等.基于灵敏度分析的直流受端系统紧急切负荷控制优化方法[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7267-7275,7453.
SUN Dayan, ZHOU Haiqiang, XIONG Haoqing, et al. A sensitivities analysis based emergency load shedding optimization method for the HVDC receiving end system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7267-7275, 7453.
- [9] LI B, SANSVINI G. Effective multi-objective selection of inter-subnetwork power shifts to mitigate cascading failures [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 134: 114-125.
- [10] 甘国晓,耿光超,仲悟之,等.电力系统暂态稳定紧急控制并行序贯优化算法[J].电力自动化设备,2018,38(8):68-73.
GAN Guoxiao, GENG Guangchao, ZHONG Wuzhi, et al. Parallel sequential optimization algorithm for transient stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 68-73.
- [11] MAJIDI M, AGHAMOHAMMADI M R, MANBACHI M. New design of intelligent load shedding algorithm based on critical line overloads to reduce network cascading failure risks [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2014, 22(6): 1395-1409.
- [12] 任建文,何培成,何宸.基于虚拟控制单元与启发式搜索的线

- 路过载紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 33-38, 69.
REN Jianwen, HE Peicheng, HE Chen. Emergency control strategy against line overload based on virtual control units and heuristic search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 33-38, 69.
- [13] 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.
- [14] 王紫琪, 和敬涵, 张大海. 双目标递进式断面过载保护控制协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 140-148.
WANG Ziqi, HE Jinghan, ZHANG Dahai. Bi-objective progressive coordinated optimization strategy for protection and control of transmission section overload[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 140-148.
- [15] 周泽昕, 王兴国, 杜丁香, 等. 过负荷状态下保护与稳定控制协调策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 146-153.
ZHOU Zexin, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. A coordination strategy between relay protection and stability control under overload conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 146-153.
- [16] 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-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 116-121.
- [17] 任建文, 李莎, 严敏敏, 等. 基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 392-397.
REN Jianwen, LI Sha, YAN Minmin, et al. Emergency control strategy of line overload based on power flow tracing algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 392-397.

作者简介:



王紫琪

王紫琪(1992—),女,河北保定人,工程师,博士,主要研究方向为能源互联网智能化规划、智能电网规划、智能变电站、交直流混联系统保护与控制(E-mail: 15201343340@163.com);

李军(1963—),男,北京人,高级工程师,研究方向为通信工程技术(E-mail: junli1234@163.com);

陈炜(1985—),男,陕西西安人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统分析运行与控制、微电网及智能电网(E-mail: wayneblue1223@qq.com)。

(编辑 任思思)

Coordination and optimization method of line overload protection and control measures based on subsection iteration

WANG Ziqi, LI Jun, CHEN Wei, XIAO Zhihong, ZHANG Xianglong, SHEN Hongming
(State Grid Economic and Technological Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: In the case of line overload, improper action of protection, and unreasonable cooperation of protection and control measures contribute to the expansion of accident and serious consequences. Aiming at this problem, a coordination and optimization method of line overload protection and control measures based on subsection iteration is proposed to realize the deep interaction and cooperation of protection and control strategies. The proposed method divides the limit operation time of line thermal stability into sections, and constructs the corresponding protection and control optimization model in the current time period. At the same time, according to the implementation of control measures, the power value of the overloaded line is calculated by rolling, the operation time of overload protection is adjusted, and the iterative optimization of the protection and control measures can be realized. The proposed method is beneficial to prolonging the operation time of overload protection, expanding the scope of control resources and obtaining better adjustment effect. The effectiveness of the proposed method can be verified by simulative results.

Key words: emergency control; overload protection; line overload; cascading failure; subsection iteration; power flow tracing

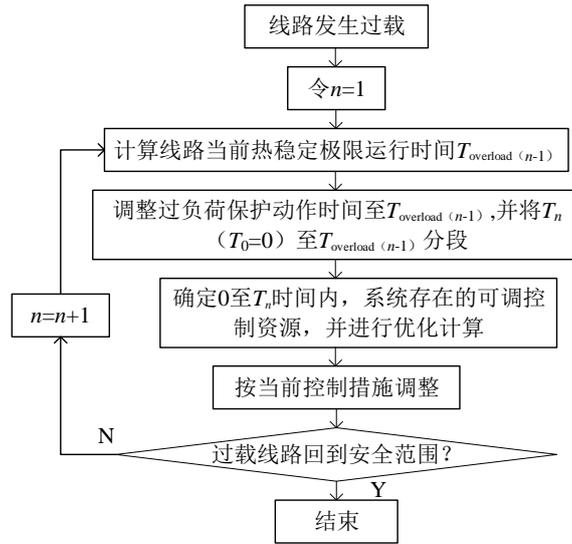


图 A1 分段协调流程图

Fig.A1 Flowchart of subsection coordination

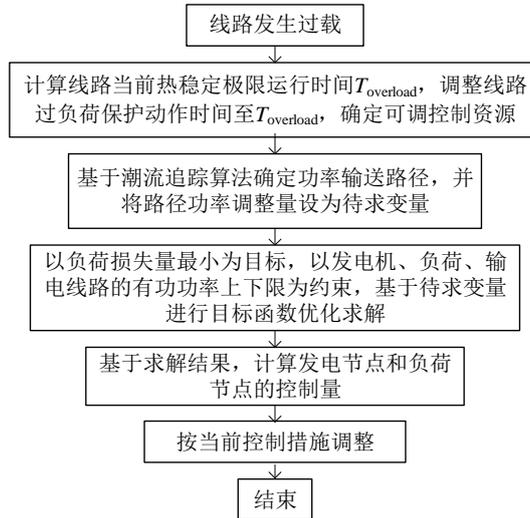


图 A2 保护控制协调计算流程图

Fig.A2 Flowchart of protection and control coordination