应对特高压环网故障热稳问题的多直流紧急控制策略

项锦晔[1],张爱军[2],陈得治[3],刘石川[2],杨明玉[1],邢华栋[2],白帅涛[1],
周 婕[1],李立新[3],吉 平[3],唐晓骏[3],宋云亭[3]
(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003;2. 内蒙古电力科学研究院,
内蒙古 呼和浩特 010020;3. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:首先提出一种定位特高压环网开断故障下热稳问题的精准、遍历搜寻方法;然后建立了特高压直流矫正环网热稳问题的优化模型,并提出了一种快速、实用的定步长梯度下降寻优方法。求解过程中,提出了特高压环网目标线路的等效送、受端概念;同时,多直流调制灵敏度、调制方向、调制步长以及每一迭代步调制效果等的给出增强了控制策略寻优的物理意义。最后,基于实际的特高压环网工程,采用PSD-BPA仿真软件,对所提方法和策略的有效性进行了仿真验证。

关键词:特高压环网;多馈入直流;直流功率紧急调制;热稳定性;灵敏度分析;梯度下降法
中图分类号:TM 721.1 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.201909014

0 引言

为满足日益增长的电能需求,支撑多直流馈入[1-3],受端电网开展了1 000 kV特高压环网的建设,为电力输送、消纳提供通道的同时,新电网格局下的运行特性也变得愈加复杂、难控。针对多直流馈入的受端特高压环网易引发的热稳、电压稳定等运行问题,从工程实际出发,亟需充分利用多特高压直流快速可控等优势来进行安全稳定问题的多特高压直流紧急、矫正控制。因此,研究一种物理意义较为明确、易于实现的多特高压直流紧急控制策略,以应对受端电网安全稳定问题,具有较强的现实意义。

针对于受端环网热稳问题的诊断等,已有研究开展了相关的工作,文献[4-6]分析了热稳问题是制约断面输电极限的主要因素之一,并提出了提高断面输电能力的方法;文献[7-9]给出了断面输电极限计算方法,但上述研究更多是涉及具有明显送、受端特征的电力输送断面,没有涉及多特高压直流分层馈入特高压环网的热稳问题的查找、定位方法。

直流功率紧急调制可快速、有效地解决电网中存在的热稳问题。文献[10]提出了直流功率转移影响因子概念,研究分析了直流单极闭锁后,直流功率的转移给川渝电网带来的热稳与暂稳问题。文献[11]基于扩展等面积算法优化紧急功率支援的功率变化量、变化速率等参数,提出的模型和求解算法理论性较强,但是控制策略求解过程的物理意义有待进一步加强。文献[12]用直流输电系统功率调制技术来提高交直流混联电网的有功输送水平及其热稳定性。在已有成果中,并没有针对多直流馈入的特高压环网的网架格局及特征,开展直流调制解决环网故障后热稳问题的具体措施等相关研究。

本文依托山东—河北特高压环网建设工程,分析了特高压环网N-2等严重故障下的热稳风险,提出了诊断环网热稳问题的精准、遍历搜寻方法;针对热稳问题的抑制,建立了多特高压直流紧急调制矫正环网热稳问题的优化模型,并给出一种快速、物理意义比较明晰的多特高压直流控制策略的求解方法。

1 多直流分层馈入特高压环网热稳问题的遍历定位方法

1.1 多直流馈入的山东—河北特高压环网系统

2020年山东—河北特高压环网“邢台—泉城—昌乐—高乡—枣庄—菏泽”投运后,可支撑鲁固以及昭沂特高压直流分层馈入,形成多特高压直流密集馈入特高压环网的网架格局。对于1 000 kV特高压环网中的某一段特高压线路,线路的首末节点也通过500 kV电网相连,因此,形成与此段特高压线路相关的1 000 kV/500 kV电磁环网。

昭沂(上海庙—临沂)特高压直流额定功率为10 000 MW,分层馈入山东电网,低端换流站接入环网的1 000 kV高乡站、高端换流站接入500 kV电网;鲁固(扎鲁特—青州)特高压直流额定功率为10 000 MW,也分层馈入,低端换流站接入环网的1 000 kV昌乐站、高端换流站接入500 kV电网。山东环网形成后,山东交流受电断面由6回特高压线路(海河—泉城、邢台—泉城、邢台—菏泽)和4回500 kV线路(辛安—聊城、黄骅—滨州)组成。

山东—河北特高压交流环网网架结构示意图如

收稿日期:2019-04-25;**修回日期:**2019-07-18
基金项目:国家电网公司工程专项(山东—河北环网特高压交流工程电网稳定分析及安控措施研究)
Project supported by State Grid Corporation of China (Research on Stability Analysis and Security Control Measures of Shandong-Hebei UHVAC Loop Network Project)

图1所示。

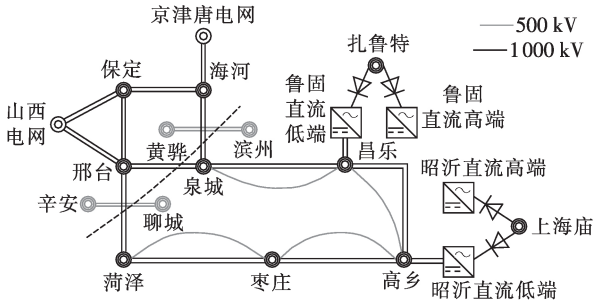

图1 山东—河北特高压交流环网网架结构示意图

Fig.1 Network structure diagram of Shandong-Hebei UHVAC loop network

1.2 定位特高压环网热稳问题的精准、遍历搜寻方法

由于两大特高压直流分层馈入，特高压低端直接落点特高压环网变电站，特高压直流的功率可在1000（直流最小输送电流为额定电流的10%）~10000 MW之间变化，因此，两大特高压直流馈入功率的不同安排可造成特高压环网上某段或者多段特高压线路发生较大功率的输送与穿越，如鲁固直流10000 MW（对称运行，高、低端各5000 MW）、昭沂直流1000 MW（对称运行，高、低端各500 MW），则昌乐—高乡特高压线路大功率东送，同时，若昌乐近区机组开机规模较大、高乡近区机组开机规模较小，昌乐—高乡东送功率将进一步加大。由于与特高压环网直接或间接相连的特高压直流功率和发电机组开机规模大小的差异化安排，可能出现特高压环网上某段线路东、西（或者南、北）方向的大功率输送，当大功率输送的方式满足N-1电网临界稳定[13]或特高压直流输送功率、机组开／关机规模的上、下限达到时，此方式可定义为特高压环网某段线路的极限运行方式。

因此，可遍历特高压环网的每一段特高压线路，通过线路近区馈入的多特高压分层直流功率在1000~10000 MW的不同安排以及近区接入500 kV的开机规模的不同调整，可以得到满足N-1安全稳定导则的某段特高压线路的东、西（或者南、北）向大功率输送的极限运行方式。基于各段特高压线路的极限运行方式，再计算相应段特高压线路N-2故障下的功率转移比，重点关注发生N-2故障后，通过1000 kV主变下注及下辖的500 kV电网迂回输送的有功功率迁移规律，进而分析功率迁移途径中各个元器件的热稳风险。

逐一得到特高压环网线路N-1极限运行方式，如表1所示。

以泉城—昌乐线路N-1极限方式为例：鲁固、昭沂分层直流功率1000 MW，泉城近区及省外机组大开机，昌乐、高乡等地区机组小开机，泉城—昌乐线路大功率东送4491 MW，且经N-1校核后电网稳定，得到泉城—昌东东送极限方式；当鲁固、昭沂直流均满送10000 MW，且昌乐、高乡等地区机组大开机，泉城近区以及省外机组小开机，泉城—昌东大功率西送6797 MW，且经过N-1校核后电网稳定，得到泉城—昌东西送极限方式。

表1 环网线路N-1极限运行方式汇总

Table 1 Summary of N-1 limit operation mode of loop network lines

MW

目标线路	鲁固直流功率	昭沂直流功率	大开机区域	小开机区域	N-1极限方式
泉城—昌乐双回东送	1000	1000	泉城近区机组	昌乐、高乡近区机组	4491
泉城—昌乐双回西送	10000	10000	昌乐近区机组	邢台、泉城近区机组	6797
昌乐—高乡双回东送	10000	1000	昌乐近区机组	高乡、枣庄近区机组	3802
昌乐—高乡双回西送	1000	10000	高乡近区机组	昌乐近区机组	2838
高乡—枣庄双回西送	10000	10000	高乡近区机组	枣庄、菏泽近区机组	2375
菏泽—枣庄双回东送	10000	1000	菏泽近区机组	枣庄、高乡近区机组	3163
邢台—菏泽双回南送	1000	1000	邢台近区机组	菏泽、枣庄近区机组	5451
邢台—泉城双回东送	1000	1000	邢台近区机组	泉城、昌乐近区机组	4037
海河—泉城双回南送	1000	1000	海河近区机组	泉城、昌乐近区机组	7258

基于各段特高压线路的极限方式，进行三永N-2开断故障的计算分析来逐一遍历、定位特高压环网的热稳问题。以邢台—菏泽段南送极限方式为例，仿真分析邢台—菏泽段特高压线路N-2功率转移比，功率转移比量化表示了故障后潮流重新转移分布的规律，具体如表2所示。

表2 全接线方式下特高压环网线路N-2功率转移比

Table 2 Power transfer ratio under N-2 fault of UHV loop network lines under full wiring mode

元件	单元件热稳极限／MW	有功／MW 故障前	有功／MW 故障后	功率增量／MW	转移比／%
邢台—泉城（2回）	>10000	4037	7159	3122	57.27
海河—泉城（2回）	>10000	7259	8237	978	17.94
辛安—聊城（2回）	2600	3506	4198	692	12.69
黄骅—滨州（2回）	2600	3560	3989	429	7.87

基于全接线方式下邢台—菏泽线路N-2功率转移比大小，当辛安—聊城一回线检修方式下，邢台—菏泽N-2后另一回线功率达到2870 MW，超过热稳限值2600 MW，出现了过载问题。

逐一对环网其他各段特高压线路极限方式开展相应段线路N-2故障的功率转移比计算，并查找、定位全接线及检修方式下环网的热稳问题。

2 矫正热稳问题的多直流调制策略

2.1 多直流调制优化模型

基于直流的初始功率$\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}$，用最小的直流调制量

$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}$来解决环网$N$-2开断后的热稳问题，这是一个非线性优化问题，其优化模型可表示为下述系列表达式。

目标函数：$\min\left|\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}\right|$。

目标约束：$P_{\mathrm{L}}(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}})<P_{\mathrm{Lmax}}$。

直流调制量约束：$0.1\boldsymbol{P}_{\mathrm{dN}} \leqslant \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}+\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}} \leqslant 1.1\boldsymbol{P}_{\mathrm{dN}}$。

其他约束：$\begin{cases} Z_{\min} \leqslant Z(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}) \leqslant Z_{\max} \\ S[\theta(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}), V(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}})]=0 \end{cases}$。

其中，$P_{\mathrm{L}}(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}})$为过载元件功率的表达式；$P_{\mathrm{Lmax}}$为元件热稳极限值；直流调制的最大量是由直流设备本体安全来决定的，功率调制范围为直流额定容量$\boldsymbol{P}_{\mathrm{dN}}$的10%~110%；$S[\theta(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}), V(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}})]$为潮流等式约束；$Z(\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}})$为其他稳定问题的不等式约束，包括直流调制过程中不引发其他的电压、频率、功角等稳定问题。一个是受端电网自身的其他稳定问题，包括调制后山东电网对外断面、调制近区电网的相关热稳、电压问题，以及网内薄弱断面，如华北—华中特高压联络断面长南线的越静稳极限问题；另一个是调制直流的送端电网的稳定约束[14]，根据具体电网来计算。

2.2　定步长的梯度下降求解算法

2.2.1　环网目标线路的等效送、受端

不形成环网的断面或者线路存在明确的送、受端，对于矫正断面或者线路的过载问题，可采取速降送端直流功率、提升受端直流功率的紧急调制措施。环网结构没有明确的送、受端概念，本文针对N-2可能出现热稳问题的环网每一段特高压线路，提出等效的送、受端概念，便于在随后的优化求解中根据直流所在的等效送、受端位置，来快速确定直流调制的方向，等效送端的直流调制采取速降的调制方向，等效受端的直流调制采取提升的调制方向。

可计算目标线路或者断面N-2后功率迁移路径中的相关元件功率的直流调制灵敏度，以此来定义目标线路或者断面的等效送、受端：

$$A_j=-\frac{\Delta P_{\mathrm{L}}}{\Delta P_{\mathrm{d}j}} \tag{1}$$

其中，A_j为直流j的调制灵敏度；$\Delta P_{\mathrm{d}j}$为直流j调制功率改变量，即调制后的直流功率与调制前直流功率的差值，此变量符号可正可负；ΔP_{L}为直流调制后相关元件的功率变化量，即调制后的元件功率与调制前的差值，此变量符号也可正可负。

根据式(1)，直流采取速升(速降)功率的调制措施后，若灵敏度为正且大于一定的阈值，则表明直流调制后相关元件功率下降(增加)较显著，可确定此直流是目标线路或断面的等效受端直流；同理可知，当直流调制灵敏度为负且模值大于一定的阈值时，可确定此直流是目标线路或断面的等效送端直流。

以图2所示环网中的bc段特高压线路及功率流向为例，当bc段N-2开断后，计算功率迁移路径中的相关元件功率的直流调制灵敏度，如直流1的调制灵敏度为负且模值大于一定的阈值，直流2的调制灵敏度为正且大于一定的阈值，则直流1、2分别是bc段线路的等效送端和受端直流。对于fe段的特高压线路及功率流向，直流1、2既可能是等效送端直流，也可能是等效受端直流，依据对此线路N-2后相关元件功率的直流调制灵敏度的正、负和灵敏度模值的大小来综合确定。

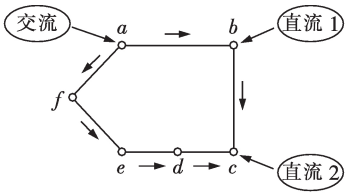

图2　环网目标线路的直流调制等效送、受端示意图

Fig.2　Schematic diagram of DC modulation equivalent sending and receiving end of target transmission lines of loop network

2.2.2　定步长梯度下降法

非线性优化问题通过定步长梯度下降法来求解，迭代公式如下：

$$\begin{cases} \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{k}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{k-1}+\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{k} \\ \Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{k}=\boldsymbol{T}^{k}\lambda \end{cases} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{k}$、$\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{k-1}$分别为第$k$次和第$k$-1迭代时的直流功率；$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{k}$为第$k$次迭代时直流调制量向量；$\boldsymbol{T}^{k}$为第$k$次迭代时的直流调制梯度向量；$\lambda$为直流调制步长。

根据式(1)计算第k次迭代n条直流的调制灵敏度，并得到灵敏度向量$\boldsymbol{A}^{k}$：

$$\boldsymbol{A}^{k}=[A_1^{k}, A_2^{k}, \cdots, A_n^{k}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

第k次迭代时，在n条直流的灵敏度模值中确定直流j的最大灵敏度模值：

$$\left|A_j^{k}\right|=\max\left\{\left|A_1^{k}\right|, \left|A_2^{k}\right|, \cdots, \left|A_n^{k}\right|\right\} \tag{4}$$

进一步得到直流调制的梯度向量$\boldsymbol{T}^{k}$：

$$\boldsymbol{T}^{k}=\left[0, \frac{A_j^{k}}{\left|A_j^{k}\right|}, \cdots, 0\right]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

迭代过程中目标直流调制量应小于其最大调制量，迭代完成后过载元件的功率应低于其热稳极限，完成热稳问题的矫正；同时在调制过程中，不能引发其他安全稳定问题。

最终得到最小调制量$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{dmin}}$如式(6)所示。

$$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{dmin}}=\sum_{i=1}^{k}\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^{i} \tag{6}$$

迭代步骤如下：

(1)确定N-2过载问题的目标线路、参与调制的

各直流初始量以及迭代的调制步长，并确定不等式约束条件范围；

(2)计算第k次迭代的$\boldsymbol{T}^k$，确定参与本次调制的直流j，并通过式(2)求出第k次迭代后的直流功率$\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^k$；

(3)校核直流最大调制量约束方程，若迭代后直流j的功率$P_{\mathrm{d}j}^k$达到最大调制量且目标约束仍不满足，则在本次及以后迭代中均去除直流j，并转入步骤(2)，否则进入步骤(4)；

(4)校核其他稳定约束$Z(\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^k)$，若调制直流$j$后不满足该约束，则在本次迭代中去除直流$j$，并转入步骤(2)，否则进入步骤(5)；

(5)校核目标约束方程$P_{\mathrm{L}}(\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^k)$，若满足则停止迭代得到最优调制方案，若不满足则恢复第k次迭代中去除的直流j，且$k=k+1$，转入步骤(2)进行下一轮迭代；

(6)得到最小调制量$\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{dmin}}$，即最优调制方案。

多直流矫正环网热稳问题的紧急调制策略流程图具体如附录中图A1所示。

3 仿真计算

基于第1节安排的特高压环网各段线路的N-1极限运行方式，遍历、定位全接线和检修方式下环网N-2开断故障下热稳问题，然后通过梯度下降法求解多直流调制矫正热稳的优化模型，得到相应直流调制措施，直流调制措施汇总表见附录中表A1。

以辛安—聊城一回线检修时，邢台—菏泽南送功率5 453 MW的典型方式为例。1 000 kV邢台—菏泽双回线路发生三永N-2故障，辛安—聊城另一回线过载，此时P_{L}^0=2 870 MW。

根据梯度下降法制定最佳调制措施。

由式(1)、(3)—(5)得到鲁固、昭沂直流灵敏度分别为A_1^1=0.31、A_2^1=0.22，以及灵敏度向量$\boldsymbol{A}^1=[0.31, 0.22]^{\mathrm{T}}$，最终得到梯度$\boldsymbol{T}^1=[1,0]^{\mathrm{T}}$。

取固定步长λ=50 MW，根据式(2)得到第一次迭代后目标直流功率$\boldsymbol{P}_{\mathrm{d}}^1=[1\,050, 1\,000]^{\mathrm{T}}$ MW，目标线路功率P_{L}^1=2 854 MW。

迭代过程中调制直流的选取如表3所示。

表3 迭代过程分析

Table 3 Iterative process analysis

迭代次数	鲁固直流灵敏度	昭沂直流灵敏度	调制直流
1	0.31	0.22	鲁固直流
2	0.31	0.22	鲁固直流
⋮			
13	0.24	0.25	昭沂直流
⋮			
20	0.22	0.27	昭沂直流

经过20次迭代得到鲁固、昭沂直流的调制量分别为600、400 MW，即分别提升鲁固直流600 MW、昭沂直流400 MW可解决辛安—聊城另一回线的热稳问题，如图3所示。

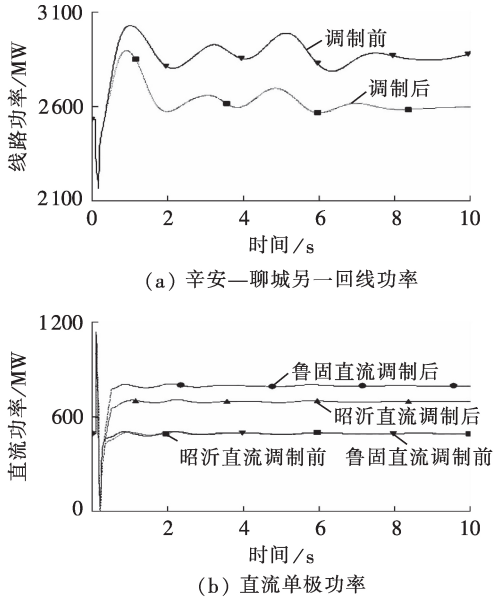

图3 邢台—菏泽线路N-2故障，直流调制前、后的仿真曲线

Fig.3 Simulative curve before and after DC modulation under N-2 faults of Xingtai-Heze transmission lines

4 结论

依托山东—河北特高压交流环网建设工程实际，本文提出了一种多直流紧急调制矫正环网N-2故障出现的热稳问题的优化模型和求解方法，所得结论如下：

(1)分析了特高压环网由于多分层特高压直流馈入功率及近区发电机组开机安排不同，而产生的特高压线路上的大幅功率穿越，N-2故障后功率迁移引发相关元件的过载风险，对此，提出了一种遍历搜寻及精准定位特高压环网N-2故障下的热稳问题的方法，能有效、全面诊断特高压环网的热稳问题；

(2)针对环网N-2故障下的热稳问题，建立了矫正热稳问题的多特高压直流调制优化模型，提出了便捷、实用的梯度下降迭代法来求解直流的调制量，求解过程中目标线路或者断面的等效送受端、调制灵敏度、调制方向、调制步长及调制效果的给出增加了寻优的物理意义。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] 袁森，陈得治，罗亚洲，等. 直流闭锁冲击弱交流通道的稳定特性及多资源协调控制措施[J]. 电力自动化设备，2018，38(8)：203-210.
YUAN Sen，CHEN Dezhi，LUO Yazhou，et al. Stability characteristics and coordinated control measures of multi-resource for DC blocking fault impacting weak AC channel[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(8)：203-210.

[2] 程斌杰，徐蔚，徐政. 基于多直流落点系统稳定性的电网静态分区方案选择方法[J]. 电力自动化设备，2016，36(12)：129-135.

CHENG Binjie,XU Wei,XU Zheng. Static segmentation scheme selection based on stability of multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):129-135.

[3] 杨冬，周勤勇，刘玉田. 一种适用于多直流馈入系统的限流措施优化配置方法[J]. 电力自动化设备，2015,35(6):93-98,129.
YANG Dong,ZHOU Qinyong,LIU Yutian. Optimal configuration of current-limiting measures for multiple DC infeed system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):93-98,129.

[4] 沈郁，熊永新，姚伟，等. ±1 100 kV 特高压直流输电受端接入方式的综合评估[J]. 电力自动化设备，2018,38(8):195-202.
SHEN Yu,XIONG Yongxin,YAO Wei,et al. Comprehensive evaluation for receiving end connection scheme of ±1 100 kV UHVDC power transmission[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):195-202.

[5] 贺庆，张宝家，马士聪，等. 特高压交直流接入下山东断面输电能力提高措施[J]. 电网技术，2018,42(1):126-132.
HE Qing,ZHANG Baojia,MA Shicong,et al. Research on the measures to increase transmission capacity of Shandong section under ultra-high voltage AC/DC access[J]. Power System Technology,2018,42(1):126-132.

[6] 周孝信，郭剑波，胡学浩，等. 提高交流 500 kV 线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术，2001,25(3):1-6.
ZHOU Xiaoxin,GUO Jianbo,HU Xuehao,et al. Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500 kV transmission lines[J]. Power System Technology,2001,25(3):1-6.

[7] 崔晓丹，方勇杰，周霞，等. 基于风险的输电断面经济输电功率计算[J]. 电力系统自动化，2014,38(8):30-34.
CUI Xiaodan,FANG Yongjie,ZHOU Xia,et al. Risk-based economical transmission power calculation of transmission sections[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(8):30-34.

[8] 赵娟，申旭辉，吴丽华，等. 结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法[J]. 电力系统保护与控制，2015,43(3):97-101.
ZHAO Juan,SHENG Xunhui,WU Lihua,et al. Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid cross-section with DC power flow model[J]. Power System Protection and Control,2015,43(3):97-101.

[9] 窦飞，乔黎伟. 架空线路输电能力计算[J]. 电力建设，2010,31(12):23-25.
DOU Fei,QIAO Liwei. Transmission capability calculation of overhead transmission lines[J]. Electric Power Construction,2010,31(12):23-25.

[10] 陈汉雄. 直流功率转移对川渝弱交流电网安全稳定影响分析[J]. 电网技术，2018,42(12):4145-4152.
CHEN Hanxiong. Analysis and study on DC power transfer and impact on Sichuan-Chongqing grid weak AC system security and stability weak AC system security and stability[J]. Power System Technology,2018,42(12):4145-4152.

[11] 谢惠藩，张尧，夏成军，等. 交直流互联电网直流功率调制相关问题[J]. 电网技术，2009,33(4):43-50.
XIE Huifan,ZHANG Yao,XIA Chengjun,et al. Issues related to DC power modulation in AC/DC hybrid system[J]. Power System Technology,2009,33(4):43-50.

[12] 赵强，许婧，王琦，等. 宁东直流山东侧电网稳定控制措施研究[J]. 中国电力，2012,45(4):5-9.
ZHAO Qiang,XU Qian,WANG Qi,et al. Research on power grid stability control strategies for Ningdong DC line on Shandong side[J]. Electric Power,2012,45(4):5-9.

[13] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定导则:DL 755—2001[S]. 北京:中国电力出版社，2001.

[14] 屠竞哲，曾兵，杨钊，等. 准东—皖南 1 100 kV 特高压直流送端系统安全稳定控制措施研究[R]. 北京:中国电力科学研究院，2016.

作者简介：

项锦晔

项锦晔(1994—)，男，浙江磐安人，硕士研究生，主要研究方向为电力系统安全稳定控制(**E-mail**:zjpaxjy@foxmail.com)；

张爱军(1972—)，男，内蒙古呼和浩特人，高级工程师，硕士，主要从事电力系统分析研究工作；

陈得治(1974—)，男，黑龙江哈尔滨人，教授级高级工程师，博士，通信作者，主要研究方向为电力系统分析与控制(**E-mail**:chendz@epri.sgcc.com.cn)。

Multi-DC emergency control strategies for thermal stability of UHV loop network faults

XIANG Jinye[1],ZHANG Aijun[2],CHEN Dezhi[3],LIU Shichuan[2],YANG Mingyu[1],XING Huadong[2],BAI Shuaitao[1],ZHOU Jie[1],LI Lixin[3],JI Ping[3],TANG Xiaojun[3],SONG Yunting[3]

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
2. Inner Mongolia Electric Power Research Institute,Hohhot 010020,China;
3. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract:Firstly,an accurate and traversal search method for locating the thermal stability problem under interruption faults of UHV(Ultra High Voltage) loop network is proposed. Then an optimization model for UHVDC(UHV Direct Current) to correct thermal stability problem of loop network is established,and a fast and practical method for fixed-step gradient descent optimization is proposed. In the solving process, the concept of equivalent sending and receiving end of the target transmission lines of UHV loop network is proposed,and the physical meaning of the control strategy optimization method is enhanced by giving the multi-DC modulation sensitivity,modulation direction,modulation step size,the modulation effect of each iteration and so on. Finally,based on the actual UHV loop network engineering,the PSD-BPA simulation software is used to simulate and verify the effectiveness of the proposed method and strategy.

Key words:UHV loop network;multi-infeed DC;emergency modulation of DC power;thermal stability;sensitivity analysis;gradient descent method

附录

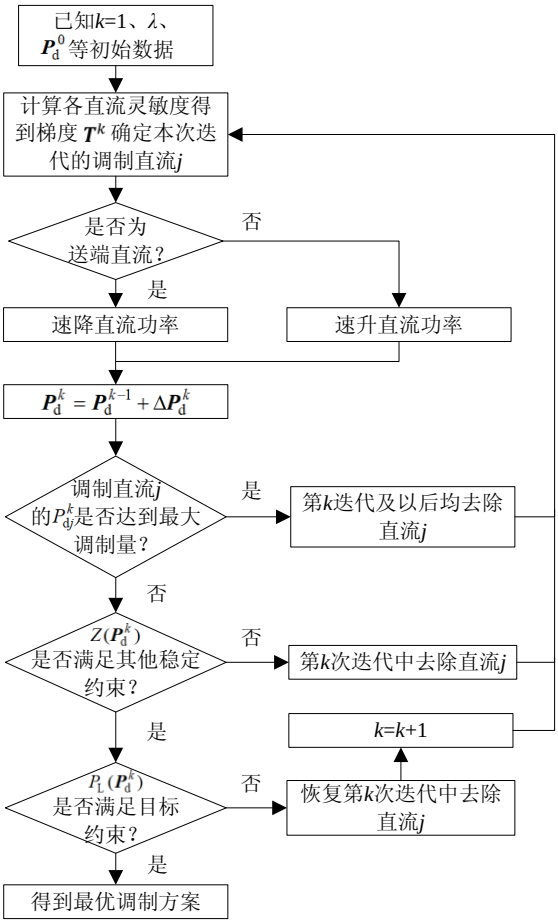

图 A1 直流调制策略迭代求解流程图

Fig.A1 Iterative solution flowchart for DC modulation strategies

表 A1 直流调制策略汇总表

Table A1 Summary of DC modulation strategies

线路 N-2 极限基础方式	接线方式	直流功率	故障名称	失稳形式	直流调制措施
邢台—菏泽双回南送功率 5 453 MW	辛安—聊城一回线检修	鲁固、昭沂各 1 000 MW	邢台—菏泽双回三永 N-2 故障	辛安—聊城另一回 2 880 MW，限值 2 600 MW，过载	提升鲁固直流 600 MW 并提升昭沂直流 400 MW
邢台—菏泽双回南送功率 5 471 MW	黄骅—滨州一回线检修	鲁固、昭沂各 1 000 MW	邢台—菏泽双回三永 N-2 故障	黄骅—滨州另一回 2 954 MW，限值 2 600 MW，过载	提升鲁固直流 800 MW 并提升昭沂直流 800 MW
邢台—泉城双回东送功率 4 307 MW	辛安—聊城一回线检修	鲁固、昭沂各 1 000 MW	邢台—泉城双回三永 N-2 故障	辛安—聊城另一回 2 936 MW，限值 2 600 MW，过载	提升鲁固直流 800 MW 并提升昭沂直流 700 MW
昌乐—高乡双回东送功率 4 054 MW	昌乐 II 段的一台主变检修	鲁固 10 000 MW、昭沂 1 000 MW	昌乐—高乡双回三永 N-2 故障	昌乐 I 段单主变功率 3 830 MW，限值 3 500 MW，过载	速降鲁固直流功率 2 500 MW 并提升昭沂直流 2 000 MW
昌乐—高乡双回东送功率 4 565 MW	菏特—邢台一回线检修	鲁固 10 000 MW、昭沂 1 000 MW	昌乐—高乡双回三永 N-2 故障	昌乐 I 段单主变功率 3 802 MW，限值 3 500 MW，过载	速降鲁固直流功率 2 500 MW 并提升昭沂直流 1 950 MW
高乡—枣庄双回西送功率 2 721 MW	高乡一台主变检修	鲁固、昭沂各 10 000 MW	高乡—枣庄双回三永 N-2 故障	高乡另一台主变功率为 3 599 MW，限值 3 500 MW，过载	速降昭沂直流 300 MW 并速降鲁固直流 200 MW
海河—泉城双回南送功率 7 370 MW	辛安—聊城一回检修	鲁固、昭沂各 1 000 MW	海河—泉城双回三永 N-2 故障	辛安—聊城另一回 3 029 MW，限值 2 600 MW，过载	提升鲁固直流 1 800 MW
海河—泉城双回南送功率 7 399 MW	黄骅—滨州一回线检修	鲁固、昭沂各 1 000 MW	海河—泉城双回三永 N-2 故障	黄骅—滨州另一回 3 412 MW，限值 2 600 MW，过载	提升鲁固直流 4 400 MW