

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.010

电网系统保护在线监视研究及典型应用

王轶禹, 王晶, 冯长有, 庄伟, 曲翀, 刘华坤

(国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘要:为应对复杂交直流大电网出现的新型安全稳定问题,我国正在积极开展系统保护建设,由于其覆盖范围广泛、控制资源众多、控制策略复杂、动作影响巨大,因此实时调度运行中须全面掌握系统保护运行状态并动态优化动作策略。文中首先提出了大电网系统保护在线监视及策略优化的总体框架,主要包括状态监视、仿真建模、在线校核、策略优化等主要环节。随后,探讨了各环节中关键技术的基本思路,重点论述了策略优化辅助决策的具体方法,主要探讨了频率越限辅助决策和断面潮流越限辅助决策。最后,给出了在华东电网频率协控系统、华中电网天中直流受端协控系统中的应用,验证了文中方法的有效性。

关键词:交直流电网;系统保护;在线监视;实时校核;辅助决策

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0063-08

0 引言

目前,我国已初步建成世界上规模最大的特高压交直流混联电网,交直流、送受端耦合日趋紧密,故障影响全局化,直流大规模投产后直流故障引发的交流电网电压、频率、断面问题日益突出^[1-5]。为应对复杂大电网出现的新特征,文献[6-7]提出了系统保护的概念,其基本思路是构建实时、紧急、闭环的安全综合防御体系,实现对电网所有重要元件的全景状态感知、各种可控资源的多维协同优化控制。系统保护通常系统化设计安全稳定控制装置,调用源、网、荷等多方面控制资源防御严重故障,确保大电网稳定运行。

目前我国各大区域电网已逐步研究并构建了系统保护,各系统保护根据区域电网特点具有不同的目标。例如,华东电网频率紧急协调控制系统(简称华东频率协控系统)采用直流调制、精准切除可中断负荷、切抽蓄机组等多项措施应对直流闭锁后的频率跌落问题^[8-9]。华中电网天中直流受端协控系统(简称华中天中直流协控系统)采取直流调制、切负荷、切抽蓄机组等措施应对直流闭锁后的断面越限问题^[10]。文献[11]提出适应水电汇集多直流弱送端电网的系统保护架构和功能配置方案。

由于系统保护调用资源多、涉及设备多、控制逻辑复杂、动作影响面广,系统保护动作后电网运行方式会发生巨大变化^[8-12],若调度运行过程中不对其在线监视,无法准确了解系统保护实时运行状态、实时可用资源以及故障后具体动作结果,调控人员将无法预判事故后电网运行状态,造成巨大风

险。因而,亟需在实时调度运行中建立大电网系统保护在线监视功能。已有的系统保护动作策略均通过典型方式离线计算得出,一方面可能难以适应实时运行中的所有状态,另一方面离线计算均采用极端运行方式,可能未充分利用各项控制资源或措施量过多。针对上述不足,系统保护在线监视功能还需实时在线校核系统保护对实际运行方式的适应性^[13-14],若出现不适应情况还应开展辅助决策分析给出调整电网运行方式或系统保护方式的建议。

文献[15-16]提出了安控装置数据接入调控中心的方案,设计了采集、监视、告警、预警、辅助决策和控制功能于一体的软件体系,开发了安控解析服务功能。文献[17-18]提出了安控装置及控制策略在暂态计算中的建模方法,为系统保护在线监视功能的开发奠定了重要基础。然而,已有文献均未探讨如何实现源、网、荷等多方面控制资源的状态监视,且已有研究和工程应用中均未对系统保护策略开展在线安全校核及辅助决策。为此,文中提出了系统保护在线监视功能的总体框架,重点介绍了系统保护状态监视、系统保护建模、在线校核、策略优化辅助决策等关键技术,最后给出了在华东电网、华中电网的相关应用情况。

1 系统保护在线监视总体框架

如图1所示,我国特高压交直流大电网中有部分是可控的源网荷资源,其关键运行信息均上传至系统保护装置,同时系统保护装置向可控资源下发动作命令。为有效在线监控系统保护的运行,在区域电网调度控制系统中构建了系统保护在线监视功能,主要包括状态监视、仿真建模、在线校核、策

略优化等环节。系统保护给出的控制策略可用于调整电网运行方式和系统保护方式。

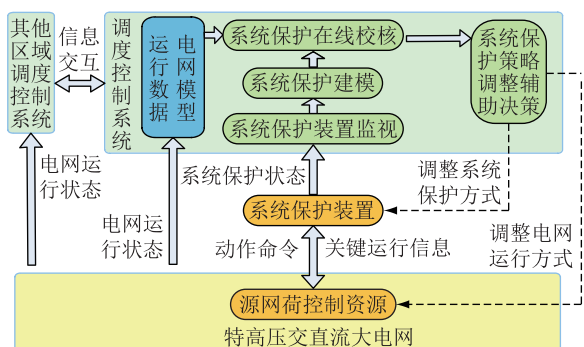


图1 系统保护在线监视总体框架

Fig.1 Framework of system protection online monitoring

此外,系统保护可能涉及不同层级调度,各区域调度控制系统信息交互,实现信息和资源共享。

2 系统保护在线监视功能的关键技术

2.1 系统保护状态监视

系统保护装置需将其运行状态实时上传至相应调控中心,需实时监视的内容包括装置运行状态、装置控制方式、资源调节量、动作信息等,具体状态监视内容归纳为表1。

表1 系统保护在线监视主要内容

Table 1 Main contents of system protection online monitoring

监视内容	具体内容
装置运行状态	装置的运行状态、通道状态、量测数据,是否存在影响装置运行的异常告警
控制方式	安控装置方式压板、功能压板、切机切负荷压板、检修压板、试验压板等状态
资源调节量	可调制直流量、可切机量、可切负荷量、可切抽蓄机组量
动作信息	安控启动、安控出口、主站下发的命令、子站执行的命令等信息

对系统保护而言,本区域系统保护动作不仅影响本区域电网运行,也可能会影响具有电气连接的其他区域电网运行。例如华东频率协控系统动作后,会调制华北、华中、西南、西北等电网送华东电网的直流。因此,系统保护状态监视模块应具备信息共享功能,将监视信息共享至相关调度机构,同时当系统保护动作时向相关调度推送告警。

应注意的是,系统保护监视功能建设应与系统保护建设同步开展,系统保护设计实施过程中需考虑各类信号接入调度中心的具体要求。

2.2 系统保护仿真建模

目前,系统保护装置一般分为总站、主站及子

站三层。由于各区域电网的电源结构、电网架构各有特点,其电网特性与面临的主要风险也各不相同。因此,各区域电网系统保护装置的特点是种类繁多、结构复杂、个性化程度较高,难以实现规范化、完整化的建模。因此,应采用分层次、面向对象的简化建模方式,既能在模型中实现系统保护的功能,又便于在线校核计算。

根据系统保护结构特点,可按照总站、主站、子站三层架构的方式对系统保护装置进行仿真建模。其中,总站模型的主要功能包括运行方式判断、总策略生成;主站模型的主要功能包括控制策略转发和运行方式汇集;子站模型的主要功能包括运行方式识别、故障识别及策略执行等^[13]。文中列出了2种典型的系统保护建模及应用简介。

2.2.1 频率紧急协调控制系统

为应对单回或多回直流闭锁后受端交流电网功率大额缺失、电网频率快速下降的问题,需采取调制直流、切除抽蓄机组、切除可中断负荷等措施确保频率稳定。华东频率协控系统是其典型应用,华东电网联网方式示意如图2,送华东电网直流闭锁后采取调制华北、西北、华中、西南电网送华东所有直流,切除华东网内多座抽蓄机组,切除江苏等省内可中断负荷等措施保证华东电网频率稳定^[8]。

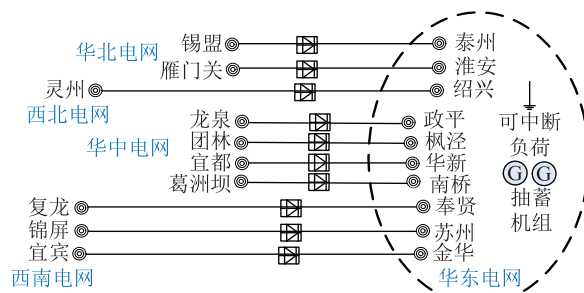


图2 华东电网联网方式示意

Fig.2 Network diagram of East China Grid

如图3所示,控制系统分为3个层次,协控总站进行总体策略制定;直流协控主站、抽蓄协控主站、切负荷主站等是各类控制措施的分指挥部,主要实现信息汇总和措施分配。各控制子站负责被控元件的状态监视,执行上级下发的控制命令。为简化起见,对负荷控制终端群不进行建模,可中断负荷子站的措施直接与220 kV主变所接负荷关联。

2.2.2 断面紧急协调控制系统

为应对直流闭锁后受端交流电网功率大额缺失,导致电网交流联络线功率大幅波动而解列的问题,需采取调制直流、切除抽蓄机组、切除负荷等措施确保关键交流断面不越限。华中天中直流协控系统是其典型应用,电网联网方式示意如图4所示,

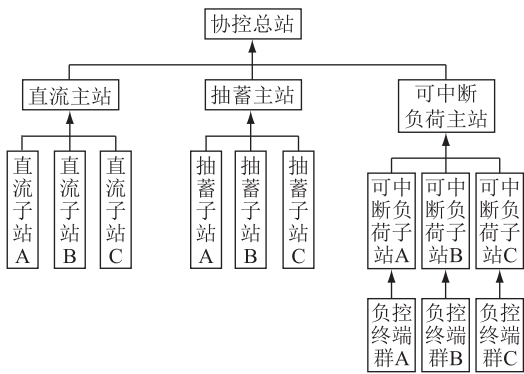


Fig.3 Structure of emergency coordination control system for East China Grid coping with frequency stability problem

天中直流闭锁后采取调制华中送华东直流、切除河南内部抽蓄机组和负荷等措施保障华北与华中电网间交流联络线的稳定^[10]。

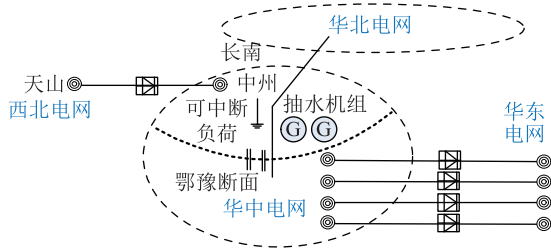


图4 华中电网联网方式示意

Fig.4 Network diagram of Central China Grid

如图5所示,控制系统仿真建模也分为3个层次,不同的是,在主站层增加了信息采集主站,进行电网联络线实时运行状态采集。

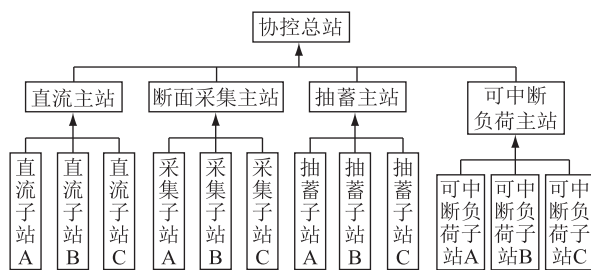


Fig.5 Structure of Tianzhong UHVDC receiving-end security and stability control system

2.3 系统保护在线校核计算

系统保护校核包括基于运行状态的校核及基于仿真计算的在线校核^[19-22]。

基于运行状态的校核主要校核系统保护方式是否满足离线决策要求。系统保护方式压板、功能压板等与当前电网运行方式是否一致;可调制直流流量、可切负荷量、可切抽蓄机组量等控制资源是否满足离线方式计算结果要求。

基于仿真的在线校核根据系统保护模型、运行状态数据及电网模型、实际运行数据开展电网实时运行仿真,校核系统保护与实际电网运行方式的适应性。校核场景分为实时态校核和未来态校核。

(1) 实时态校核。重点针对特高压直流双极闭锁故障及多回线路同时故障等严重故障,考虑系统保护动作逻辑,开展静态安全分析、暂态稳定分析计算,实时扫描预想故障情况下电网频率、断面潮流及节点电压是否越限,校核系统保护方式和当前电网运行方式适应性。

(2) 未来态校核。整合发电计划、超短期负荷预测、检修计划等数据,形成未来4h内电网运行状态,开展常规故障及严重故障情况下的静态安全分析、暂态稳定分析计算,校核系统保护方式和未来电网运行方式的适应性。

为提高实时态、未来态校核的针对性和准确性,可采用故障集动态调整的优化策略。实时监控主网线路外部风力、雷电、山火、覆冰等气象信息,通过监测值与告警阈值对比判断线路运行风险,将存在运行风险的线路自动纳入扫描故障集中,实现校核故障集动态调整。

2.4 系统保护策略调整辅助决策

针对实时态或未来态在线校核出的电网运行风险,在保证电网频率、断面潮流不越限的前提下,以切负荷量最低为目标,自动给出系统保护方式和电网运行方式调整的辅助建议,经故障集仿真校核和调控人员确认后,调整系统保护方式或电网运行方式。以下主要探讨频率越限辅助决策和断面潮流越限辅助决策。

2.4.1 频率越限辅助决策

针对故障后频率问题,重点分析优化直流调制量、可切抽蓄机组量、可切负荷量等多种措施,在满足频率要求的同时尽量减少切负荷量。单回或多回直流闭锁后,考虑各项措施量后受端交流电网的功率缺额可表示为:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{loss}} - \Delta P_{\text{mf}} - \Delta P_{\text{ps}} - \Delta P_{\text{load}} \quad (1)$$

式中: ΔP_{loss} 为直流闭锁损失功率; ΔP_{mf} , ΔP_{ps} , ΔP_{load} 分别为调制直流量、切除抽蓄机组量、切除负荷量。

此时,交流电网的实际频率跌落值为:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K_g P_g + K_L P_L} \quad (2)$$

式中: P_g , P_L 分别为交流电网的总发电机容量和负荷; K_g , K_L 分别为单位容量发电机和负荷的频率响应系数,该参数可根据电网故障后频率响应情况求取。

为保障直流故障后系统保护正确动作不触发

第三道防线,频率跌落的下限值为:

$$\Delta f_{\max} = f - f_{\min} \quad (3)$$

式中: f 为电网实际频率; f_{\min} 为最低频率要求。

因此,功率缺额上限值为:

$$\Delta P_{\max} = (f - f_{\min})(K_g P_g + K_L P_L) \quad (4)$$

若实际功率缺额大于功率缺额上限值,则需要根据电网实际运行情况,按照提升直流调制量、增加切抽蓄机组量、增加切负荷量、调减直流运行功率的先后顺序给出调整策略建议。其中提升直流调制量的约束包括调制后满足直流送电能力限制、直流送受端交流断面限制以及送端交流电网频率约束。增加切抽蓄机组量的约束包括当前抽蓄机组容量和交流断面约束。增加切负荷量的约束包括可控负荷大小以及切负荷上限比例限制。调减直流运行功率的约束主要是送端清洁能源外送需求约束及受端电力平衡约束^[23],具体流程如图6所示, ΔP_a 为需增加的额外控制量($\Delta P_a = \Delta P - \Delta P_{\max}$); ΔP_{mfa} 为直流调制可增加量; ΔP_{psa} 为切抽蓄机组可增加量; ΔP_{lda} 为切负荷可增加量。

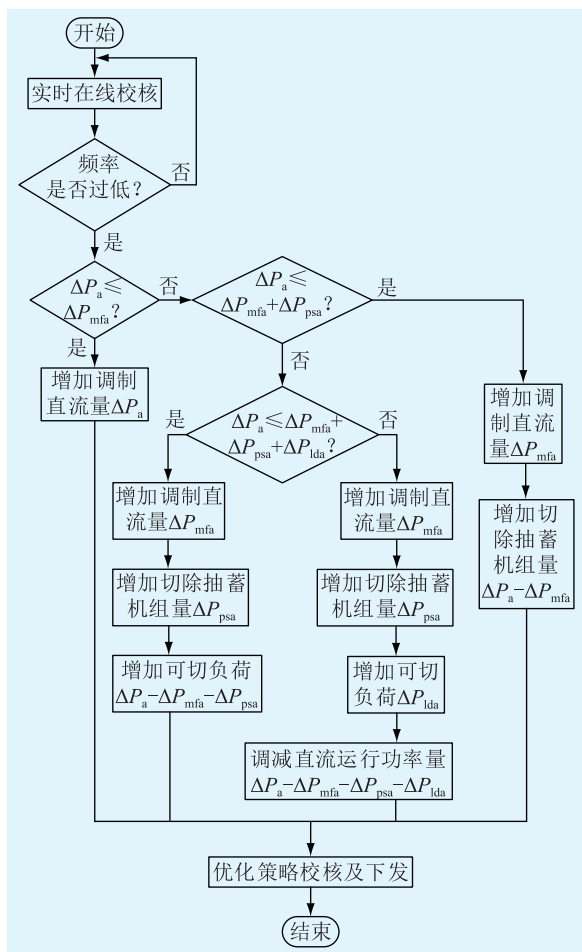


图6 频率越限辅助决策流程

Fig.6 Flow chart of assistant decision-making for frequency off-limit

若实时校核中频率不越限但切除负荷量大于预先设定值时,可以通过策略优化切负荷量。首先,可采取增加直流调制量、增加切抽蓄机组量等方式减少同等切负荷量。若切负荷量仍不满足要求,且功率缺额值至功率缺额上限值的裕度较大,可以减少部分切负荷量,尽管会降低控制裕度但仍满足控制要求。具体流程见图7, ΔP_{ld} 为预计切负荷量; ΔP_{ldset} 为切负荷预先设定值; ΔP_{ldre} 为计划减少切负荷量($\Delta P_{ldre} = \Delta P_{ld} - \Delta P_{ldset}$); ΔP_{mar} 为控制裕度。

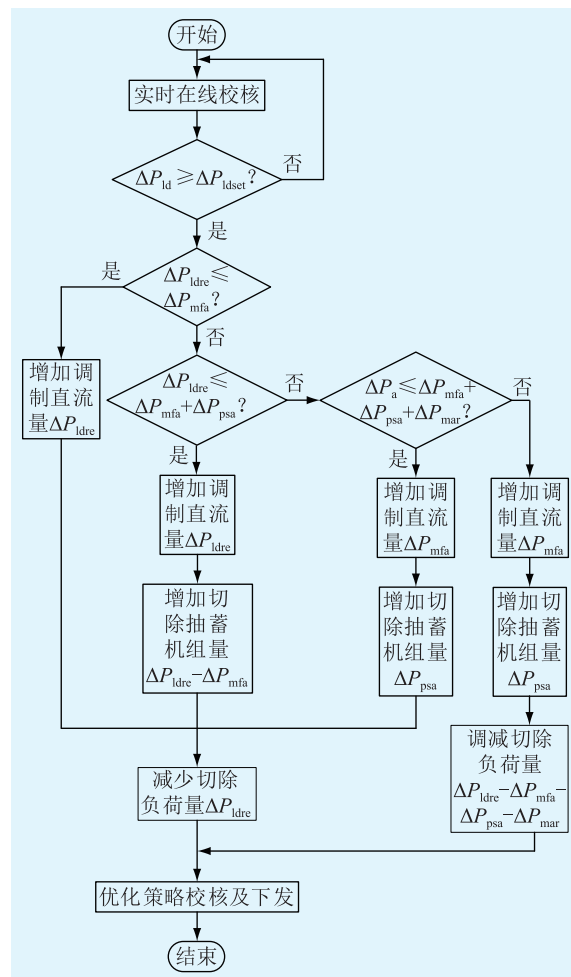


图7 可切负荷优化流程

Fig.7 Flowchart of assistant decision-making for load-shedding optimizing

2.4.2 交流联络线断面越限辅助决策

针对故障后交流联络线断面越限问题,重点分析优化直流功率、联络线功率、直流调制量、可切抽蓄机组量、可切负荷量等多种措施,满足联络线断面要求的同时减少切负荷量。

对于弱交流联络线联系的2个交流电网,若某一电网出现功率缺额,按照两区域互联系统联络线功率波动线性化模型^[24],联络线波动的最大值为:

$$\Delta P_{tie} = \Delta PH_{\Sigma 1} (e^{-\pi \varepsilon \sqrt{1-\varepsilon^2}} + 1) / (H_{\Sigma 1} + H_{\Sigma 2}) \quad (5)$$

式中: H_{S1} , H_{S2} 分别为 2 个交流电网的总惯性常数; ε 为区域振荡模式的阻尼比。

为保障故障后交流联络线功率不超过静稳极限,则联络线波动最大值应为:

$$\Delta P_{tie,max} = P_{max} - P_{tie,0} \quad (6)$$

式中: $P_{tie,0}$, P_{max} 分别为交流联络线的初始功率和静稳极限值。

若实际功率缺额大于功率缺额上限值或切负荷量较大,同样可以采取频率辅助决策的策略通过增加直流调制量、增加切抽蓄机组量、调减直流运行功率等方式进行调整。

3 典型应用案例

3.1 华东频率协控系统

如图 8 所示,华东频率协控系统在线监视功能实时采集所有主子站的装置状态、控制方式以及各子站的可调制直流量、可切抽蓄机组量、可切负荷量等数据,以及各装置动作情况。同时,协控系统状态信息在国调、华东、华北、华中、西南、西北分中心及相关省调实时共享。



图 8 华东频率紧急协调控制系统关键信息监视

Fig.8 Key monitoring information of emergency coordination control system for East China Grid coping with frequency stability problem

对华东电网频率协控策略进行建模后,利用全网实时态和未来态数据开展在线校核。除正常直流双极、单极闭锁校核外,通过线路外部运行环境监测功能实时监视各直流环境,动态调整校核故障集,校核结果如图 9 所示。

下面给出某典型案例,线路外部运行环境监测功能显示某直流输电密集通道处出现大风天气,两回特高压直流和两回常规直流存在运行风险,在线校核功能自动开展四回直流同时闭锁故障校核。若四回直流同时闭锁,华东电网损失的受入功率 17 760 MW(送端),频率协控系统动作调制华北、西

华东电网		系统频率: 49.99 Hz 发电力: 171916 MW					
双极闭锁	复奉	锦苏	宾金	雁淮	灵绍	锦泰	
送受端	受端	受端	受端	受端	受端	受端	
最低点频率	Hz	49.92	49.82	49.79	49.99	49.99	
直流调制量	MW	0	0	2220	0	2040	
抽蓄机组调制量	MW	0	0	710	0	710	
负荷调制量	MW	0	0	0	0	0	
一次调频机组出力变化	MW	1939	2508	1287	1763	1171	
二次调频负荷频率响应	MW	247	323	163	224	149	
二次调频动作后频率	Hz	49.96	49.95	49.97	49.96	49.97	
换流站母线电压变化量	ΔU	1.51	1.67	1.64	2.10	4.84	
潮流越限数		0	2	0	0	0	
电压高于 1.1 倍厂站数		1	1	1	1	1	
电压低于 0.9 倍厂站数		0	0	0	0	0	
多馈入直流短路比		11.28	6.74	6.99	13.76	6.93	
		27.50					
换相失败							
换流站母线电压最高值	kV	529	537	546	538	549	

图 9 华东频率紧急协调控制系统在线实时校核

Fig.9 Online real-time checking of emergency coordination control system for East China Grid coping with frequency stability problem

北、西南、华中送华东的 6 回直流,增加送出 2 000 MW,切除负荷 1 000 MW,频率将大幅跌落至 48.98 Hz,设置频率为 49.0 Hz 的第一轮低频减载装置将动作切除大量负荷。实时校核给出的四回直流闭锁后受端电网频率曲线如图 10 所示。

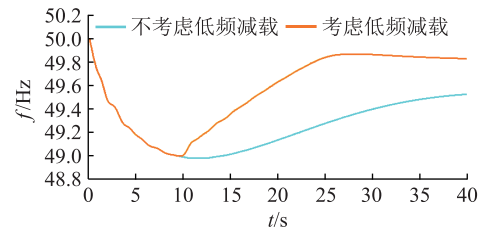


图 10 密集通道多回直流闭锁后受端频率曲线

Fig.10 Frequency curves of receiving-end after multi-HVDC blocking

针对多重故障触发低频减载的运行风险,需调整系统保护策略或电网运行方式,尽量使故障后不触发低频减载措施。按照频率下限值为 49.2 Hz 的要求,频率越限辅助决策功能给出需减少功率缺额 2 990 MW。由于电网处于腰荷情况下,无在抽水状态的抽蓄机组,且可中断负荷量已用尽。考虑直流限额、送受端交流断面限制以及送端频率要求,直流最大调制量可增加 1 100 MW。因此,存在 2 种方案,其结果见图 11。

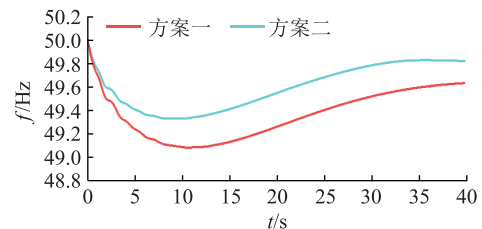


图 11 2 种改进方案后的受端电网频率曲线

Fig.11 Frequency curves of receiving-end with two improved schemes

方案一:将所有直流的提升能力设置至最大

档,直流调制能力可达 3 100 MW。受端电网最低频率可升至 49.07 Hz,虽然不会触发低频减载,但控制裕度较小,无法达到下限值 49.2 Hz 的要求。

方案二:增加直流调制量 1 100 MW 的同时,将存在运行风险的四回直流的运行功率调减 1 890 MW。受端电网最低频率可提高至 49.27 Hz,满足频率下限值要求。

增加直流调制量和调减在运直流功率后,对各种故障集进行扫描,通过校核确认不会出现频率、电压、断面越限情况。

上述案例中,针对实时运行中出现而离线方式校核未考虑的严重故障,通过系统保护在线监视功能主动开展安全校核,给出策略调整建议,确保系统保护适应电网实时运行方式。

3.2 华中天中直流协控系统

某方式下,天中直流输送功率 5 000 MW(受端 4 800 MW),河南电网通过长南线受电功率 2 000 MW,通过鄂豫断面受电功率 3 500 MW。按照安控策略,天中直流闭锁情况下将调制华中送华东直流 500 MW,切除河南负荷 1 500 MW。该策略下各断面均在稳定限额内,长南 I 线距离静稳极限仍有较大裕度。但当前切负荷措施均在郑州地区,1 500 MW 切负荷量较大,需进一步优化。

受直流调制后鄂豫断面限制,该方式下断面限额 7 000 MW,直流调制量最大可提升至 800 MW。该方式下无抽蓄机组,无法增加切除抽蓄机组量。实时校核长南 I 线的静态稳定极限为 6 350 MW,预留 2 000 MW 的控制裕度,根据华北-华中转动惯量比、振荡阻尼比,按照式(5)功率缺额的上限值为 3 540 MW。通过上述调整,切除负荷量可以调减至 460 MW。

图 12 和图 13 为直流调制量为 800 MW,切负荷量下降至 460 MW 的计算结果。可见,随着直流调制量的增加,鄂豫断面潮流略有增加但未达到稳定限额。直流调制量和切负荷量总和下降,长南线波动功率最大值增加,但距静稳极限仍有一定裕度。

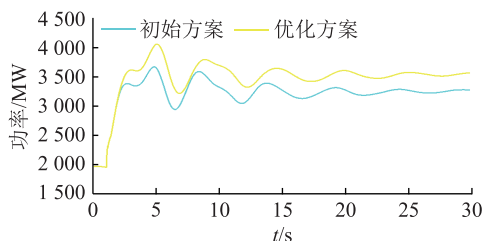


图 12 策略优化前后的长南线功率曲线
Fig.12 Power curves of Changnan line between initial and improved scheme

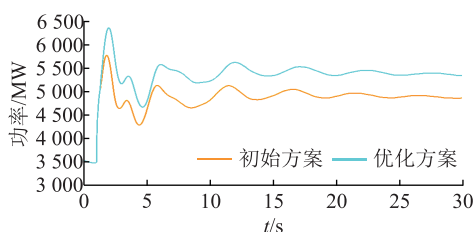


图 13 策略优化前后的鄂豫断面功率曲线
Fig.13 Power curves of Hubei—Henan section between initial and improved scheme

上述案例中,针对离线方式制定的系统保护措施过严的问题,通过系统保护在线监视功能主动开展安全校核和策略调整,能够在保证电网安全的前提下减少系统保护切负荷措施量。

4 结语

为应对我国特高压交直流电网面临的新型安全稳定问题,构建区域电网层面的系统保护是一种较好的措施。文中提出了大电网系统保护在线监视总体框架,具体包括状态监视、仿真建模、在线校核、策略优化 4 个主要环节,深入分析了各环节关键技术思路,并给出了在华东电网频率协控系统、华中电网天中直流受端协控系统中的应用情况。

文中提出的系统保护在线监视可为调度运行人员掌握系统保护运行状态及动态优化控制策略提供有力工具。随着系统保护的应用推广和功能扩展,系统保护在线监视及策略优化的需求将进一步增加,同时也需要进一步完善建模方法和策略优化方法。

参考文献:

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [2] 黄方能, 张红丽, 马骞, 等. 受端电网特高压直流系统与海上风电交互影响及评价指标[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 96-103.
HUANG Fangneng, ZHANG Hongli, MA Qian, et al. Interactive effects between HVDC of receiving-end power grid and offshore wind power and evaluation index[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 96-103.
- [3] 邓晖, 楼伯良, 华文, 等. 基于直流闭锁事故的华东电网频率特性及控制措施[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 76-81.
DENG Hui, LOU Boliang, HUA Wen, et al. Frequency characteristic of East China Power Grid based on DC block accidents and control measures[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 76-81.
- [4] 邓晖, 楼伯良, 华文, 等. 特高压直流闭锁后华东电网频率稳

- 定特性研究[J]. 智慧电力,2017,45(8):39-44.
- DENG Hui, LOU Boliang, HUA Wen, et al. Frequency stability analysis of East China Power Grid due to HVDC block [J]. Smart Power, 2017, 45(8): 39-44.
- [5] 刘世凯,赵健,宋晨光,等. 特高压直流系统单极闭锁外特性建模及仿真研究[J]. 陕西电力,2017,45(2):59-64.
- LIU Shikai, ZHAO Jian, SONG Chengguang, et al. External Characteristic modeling of UHVDC unipolar blocking and simulation [J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(2): 59-64.
- [6] 陈国平,李明节,许涛,等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 32(10): 3095-3103.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids [J]. Power System Technology, 2017, 32(10): 3095-3103.
- [7] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 8-16.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 8-16.
- [8] 许涛, 励刚, 于钊, 等. 多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 98-104.
- XU Tao, LI Gang, YU Zhao, et al. Design and application of emergency coordination control system for multi-infeed HVDC receiving-end system coping with frequency stability problem [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 98-104.
- [9] 庄伟,李德胜,于钊,等. 应对多直流同时换相失败的安全稳定控制系统[J]. 电网技术,2016,40(11):3420-3426.
- ZHUANG Wei, LI Desheng, YU Zhao, et al. Security and stability control system coping with simultaneous multi UHVDC commutation failure [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3420-3426.
- [10] 邵德军,徐友平,赵兵,等. 交直流柔性协调控制技术在华中电网的应用[J]. 电网技术,2017,41(4):1146-1151.
- SHAO Dejun, XU Youping, ZHAO Bing, et al. Application of flexible coordinated AC/DC control technology in Central China Power Grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1146-1151.
- [11] 董昱,张鑫,余锐,等. 水电汇集多直流弱送端电网稳定控制及系统保护方案[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 3095-3103.
- DONG Yu, ZHANG Xin, YU Rui, et al. Stability control and system protection scheme for power grid with hydropower pool and multi-DC weak sending-end [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 3095-3103.
- [12] 李德胜,罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):151-157.
- LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.
- [13] 郭健,周京阳,李强,等. 高性能在线分析计算现状与协同计算关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 149-159.
- GUO Jian, ZHOU Jingyang, LI Qiang, et al. Current status of high-performance on-line analysis computation and key technologies for cooperating computation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 149-159.
- [14] 陈磊,王永庆,杨昊,等. 电网安全分析与仿真技术的现状分析及发展趋势研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 33-38.
- CHEN Lei, WANG Yongqing, YANG Hao, et al. Study on current situation and development trend of power grid security analysis and simulation technology [J]. Smart Power, 2017, 45(8): 33-38.
- [15] 忽浩然,沈凤杰,汤伟,等. 新一代安控装置集中管理系统设计及工程应用[J]. 电力工程技术,2017,36(2):43-50.
- HU Haoran, SHEN Fengjie, TANG Wei, et al. Design and engineering application of centralized management system for new generation security and stability control devices [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 43-50.
- [16] 沈凤杰,张伟,张浩,等. 适应调控一体化模式的安控装置管理系统方案设计与实践[J]. 电力系统自动化,2017,41(23):143-149.
- SHEN Fengjie, ZHANG Wei, ZHANG Hao, et al. Design and practice of safety and stability control device management system adapted to integrated mode of power grid dispatching and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 143-149.
- [17] 吴国咏,宋新立,汤涌,等. 电力系统动态仿真中的安全稳定控制系统建模[J]. 电力系统自动化,2012,36(3):71-75.
- WU Guoyang, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Modeling of security and stability control system for power system dynamic simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 71-75.
- [18] 张岩,王建全,何奔腾. 一种新的电力系统稳定控制策略表述及存储方式[J]. 继电器,2003,31(12):55-57.
- ZHANG Yan, WANG Jianquan, HE Benteng. A new method of expression and storage on decision table for the stability control of power systems [J]. Relay, 2003, 31(12): 55-57.
- [19] HOU J X, LYU Y, YU Z H, et al. Research on real power grid security and stability based on big data analysis method and online data of power grid [C] // 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2018: 4468-4473.
- [20] WANG S J, PAN Y L, SU A L, et al. Research on security and stable checking algorithm of power system control [C] // 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2018: 535-540.
- [21] POLYMENEAS E, MELIPOULOS A P S. Margin-based framework for online contingency selection in unbalanced networks [J]. IEEE Trans. Power Systems, 2016, 32(1): 30-38.
- [22] SUN W T, HE X Y, TANG J C, et al. Extended application of online security and stability analysis system in Liaoning power grid [C] // 2016 China International Conference on Electricity

- Distribution (CICED);2016;1-5.
- [23] 冯长有, 陈刚, 许涛, 等. 高压直流输电系统故障后电网安
控装置调制策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 88-94.
FENG Changyou, CHEN Gang, XU Tao, et al. Novel modula-
tion strategy of stability-controlling device after failure occurred
in HVDC power transmission system[J]. Power System Tech-
nology, 2012, 36(9): 88-94.
- [24] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 两大区互联系系统交流联络线功率
波动机制与峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30
(19): 1-6.
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tie-line power
fluctuation mechanism and peak value calculation of the two la-

rge-area interconnected systems[J]. Proceedings of the CSEE,
2010, 30(19): 1-6.

作者简介:



王轶禹

王轶禹(1974),男,硕士,高级工程师,从
事电网调度运行与管理相关工作(E-mail:
wang-yiyu@sgcc.com.cn);

王晶(1987),男,硕士,高级工程师,从事
电网调度运行与管理相关工作;

冯长有(1982),男,博士,高级工程师,从
事电网调度运行与管理相关工作。

Online monitoring for large power system protection and its optimization strategy

WANG Yiyu, WANG Jing, FENG Changyou, ZHUANG Wei, QU Chong, LIU Huakun
(National Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China)

Abstract: In order to deal with the new features of complex AC/DC power grids, China is developing the construction for system protection. The broad control resources, complex control strategy and the great action response require real-time dispatching operation to fully grasp the operating state of the system and dynamically optimize the action strategy. This paper developed the overall frame of online monitoring and strategy optimization for large power grid system protection at first, including state monitoring, modeling and simulation, real-time analysis, strategy optimization, etc. Then, this paper introduced key technologies of the functions mentioned above. The specific method for strategy optimization is mainly discussed. The proposed online monitoring technology is applied to the frequency coordinating control system in East China Power Grid and the coordinating control system for the receiving end of Tianzhong UHVDC project in Central China Power Grid, which verified the effectiveness of the proposed method.

Keywords: AC/DC power grid; system protection; online monitoring; real-time check; assistant decision-making

(编辑 陈静)