海上油田群电网一体化智能监控系统研究与应用

传统海上油田群电网所配置的能量管理系统（EMS/SCADA）仅能实现对电网的基本监测和控制功能，自动化及智能化水平较低。提出海上油田群电网一体化智能监控系统方案，在现有油田群电网EMS的基础上，结合智能电网相关标准，对电网整体进行建模，将拓扑分析、状态估计及潮流计算等基本功能整合，形成海上油田群电网基础计算平台。在计算平台基础上开发海上油田群电网智能功率控制、多维性能指标监测及动态安全评估和基于在线决策的自愈控制等高级功能，实现电网“监测－预警－优化－控制”一体化智能监控，从而保证电网安全稳定和经济高效运行。

李　强[1]　张　裕[2]　林　杨[2]　胡意茹[1]　谢小荣[3]/1.中海油研究总院　2.中海石油（中国）有限公司天津分公司　3.清华大学电机工程与应用电子技术系

李　强/工程师

关键词/Keywords
海上油田智能电网·
一体化智能监控·
动态评估·
在线预决策·
智能功率调度·

0　引言

目前海上油田群电网EMS基于SCADA系统进行开发，采用轮询的方法对电网运行数据和状态进行采集，即每隔固定的间隔依次收集电网各量测点的开关状态、电压有效值、电流有效值、有功功率和无功功率等，然后将其直接显示在单线图上，供用户了解与监视电网的当前工况[1-2]。同时用户在获得操作权限后可直接在操作界面上对设备进行远程控制。现有EMS/SCADA系统及其功率控制策略能实现对电网的基本监测和控制功能，但其缺点也显而易见：①缺乏基本的拓扑分析及状态估计功能，从SCADA采集所得数据没有经过任何必要的计算即呈现给操作人员，电网操作人员不能准确地获取系统的运行工况，进而可能导致误操作，给电网的安全稳定运行带来隐患；②功率调度环节中电网约束条件考虑不足，功率控制方式没有考虑电网运行的经济性和效率；③现有EMS自动化水平较低，不能适应海上油田群电网不断扩展的趋势。

本文提出的海上油田群电网一体化智能监控系统基于现有油田群电网EMS目前的数据基础，结合智能电网相关标准，对电网整体进行建模，将拓扑分析、状态估计及潮流计算等基本功能整合，形成海上油田群电网基础计算平台，在计算平台基础上开发海上油田群电网智能功率控制、多维性能指标监测及动态安全评估和基于在线预决策的自愈控制等高级功能，实现电网“监测－预警－优化－控制”功能的集成一体化、精细模型化、在线实时化和决策智能化，实现海上油田群电网安全稳定、经济高效。

1　一体化智能监控系统框架

一体化智能监控系统采用自上而下、模块化的设计思想。将系统分为公共信息模型（Common Information Model，CIM）数据模块、拓扑分析模块、状态估计模块、潮流计算模块、智能功率控制模块、研究态模块和动态安全评估模块等。各模块之间采用统一的接口和数据形式来实现互操作及信息的交互。系统总体设计如图1所示。

2　一体化智能监控系统关键技术

一体化智能监控系统在现有EMS

863计划“油田群智能配网综合集成与示范”项目（2012AA050216）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

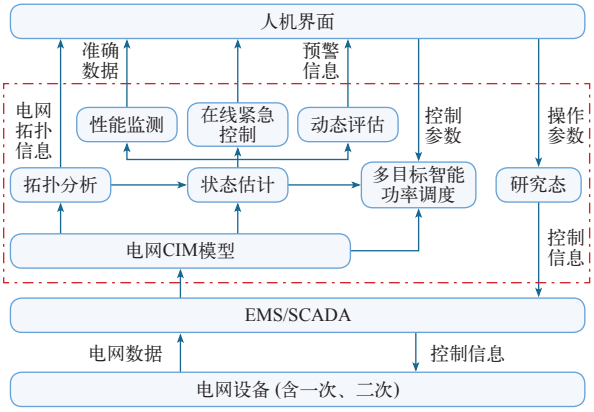


图1 一体化智能监控系统功能框架图

系统的基础上，首先建立电网的CIM模型[3-4]，建立电网公共、统一的数据模型，并通过拓扑分析模块将实际电网状态转换为计算用的母线模型。形成计算模型之后，根据状态估计模块对EMS实时量测数据进行分析，估计出电网当前准确的运行状态，将完整、可靠的数据提供给系统高级应用功能模块，如电网多维性能监测、在线紧急控制、动态评估和多目标智能功率调度等。

由于海上油田群电网集“发－输－配－用”一体，其与陆地电网有较大差异，尤其在电网多维性能监测与动态评估、在线紧急控制及多目标智能功率调度等关键技术需要进行研究与攻关。

2.1 海上油田电网多维性能监测与动态评估技术

（1）海上油田电网多性能监测

以往海上油田电网EMS主要实现了SCADA功能，对电网的监测只包括机组的热备用裕度、机组有功/无功裕度、冷备用裕度和电压偏差度。而一体化智能监控中则增加了对电网损耗、无功分区不平衡度、海缆热稳定裕度和电网机组间最大相角差等关键指标的性能监测，最终建立对海上电网的多维性能监测体系，具体如图2所示。

（2）海上油田电网动态评估技术[5]

结合海上油田群电网的特性，应评估的工况包括海缆单相接地故障、海缆无故断线故障、海缆三相短路故障（不带重合闸）和发电机无故跳闸。动态评估分为电磁暂态过程评估和机电暂态过程评估，考虑到海上电网主要分析系统受到大

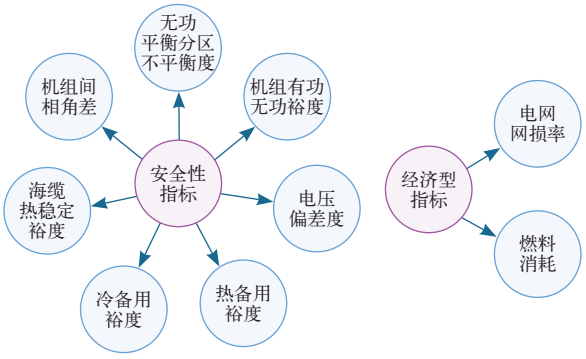


图2 海上电网多维性能监测指标

扰动后的暂态稳定和受到小扰动后的静态稳定性能，因此一体化智能监控中主要进行电力系统机电暂态仿真评估。

动态评估的流程：首先调用动态评估中潮流计算模块，得出电网当前准确状态后再依次扫描各故障类型，然后利用稳定计算模块对故障进行模拟，输出发电机、线路等设备在故障期间及故障切除后电压、功率等电气量的变化情况，以此来判断系统在故障后能否恢复稳定运行。动态评估流程如图3所示。

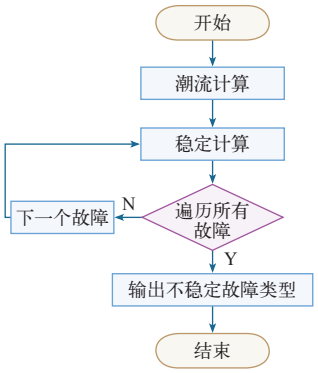


图3 动态评估流程图

2.2 海上油田电网在线预决策紧急控制技术

目前海上油田群电网EMS的紧急控制系统主要指基于离线方式的优先脱扣系统。该系统主要计算总发电功率和总负荷之间的平衡，采用离线决策的方式，在不同的拓扑和工况下，考虑了电网内所有的可卸载对象，根据不同的故障，触发相应的卸载范围，以此保证了某个设备发生故障时电网的稳定性。由于需离线将所有紧急控制策略CASE罗列出来，才可能在系统发生故障后做出

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

正确判断，因此带来了策略表数据规模大、存在失配情况等缺点，而且随着电网复杂程度的增加，建立所有的CASE以满足系统安全稳定性的要求将变得越来越困难，同时在实际控制策略的匹配中，采用近似匹配的原则，可能会发生失配的情况。

一体化智能监控系统采用基于在线预决策的海上油田群电网紧急控制策略。新的紧急控制策略与原有离线决策最大的不同在于在线预决策的运行参数是根据系统当前的运行状态不断刷新，并根据最新的电网运行参数自动生成对应的策略表，而原有离线决策由于缺乏在线更新电网参数的功能，需要制定所有电网拓扑结构及运行方式下的策略表[6-7]。新方法能有效减小策略表的规模，减少计算量，同时降低失配的情况，并能加强控制过程中系统的安全性。基于在线预决策的紧急控制策略示意图如图4所示。

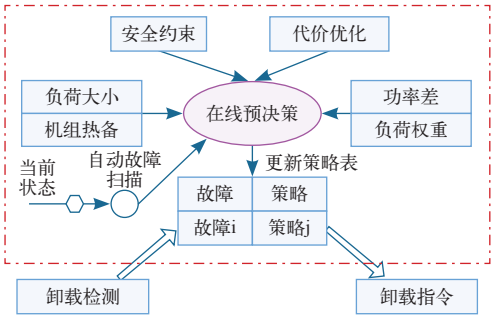


图4　基于在线预决策的紧急控制框图

基于在线预决策的紧急控制基本流程为：假定系统的运行参数在短时间内（如5 min）不会发生变化，根据系统的结构参数X、当前的运行参数Y_P以及预想的事故扰动集合Z，通过自动扫描事故生成在当前运行状态下的策略表$U=f(X,Y_P,Z)$。当检测到系统发生故障后，收集当前的事故扰动Z_P，在策略表中进行搜索匹配，从而生成包括脱扣指令在内的策略$U_P=f(X,Y_P,Z_P)$。

2.3　海上油田多目标智能功率调度技术

目前海上油田群功率控制模式比较简单：对于机组有功功率，各在线机组间有功功率按照电网负载率进行简单的分配，而机组无功功率则采用端电压控制方式，即用户通过EMS对发电机端电压设定参考数值，然后由励磁系统的自动电压调节（AVR）功能自动调整机组无功维持机端电压为参考值；当有多台机组并联接入同一母线时，还应保持无功功率在机组之间的均衡分配。上述功率控制方式对于电网运行人员而言简单易懂，有利于工程实现。但该种控制方式在经济性方面有所欠缺，在现有功率分配方式下，可能出现平台负荷与机组出力不匹配的情况，即某平台负荷水平较低时，平台机组出力反而较大，导致系统损耗的增加；同时按照负载率来分配有功功率也没有考虑机组间的燃气耗量特性，降低了机组运行的经济性。

结合海上油田群电网有功/无功结合紧密、系统响应速度快的特点，本文设计了一种适合海上油田群电网的功率优化控制算法，综合考虑海上油田群电网的有功与无功控制，实现有功与无功之间的快速协调优化。智能功率调度实质上属于电力系统最优潮流问题，即当电网系统的结构参数和负荷确定后，通过控制变量的选择，在满足约束条件的前提下，使系统一个或多个性能指标达到优化的潮流分布[8]。智能功率调度的具体流程如图5所示。

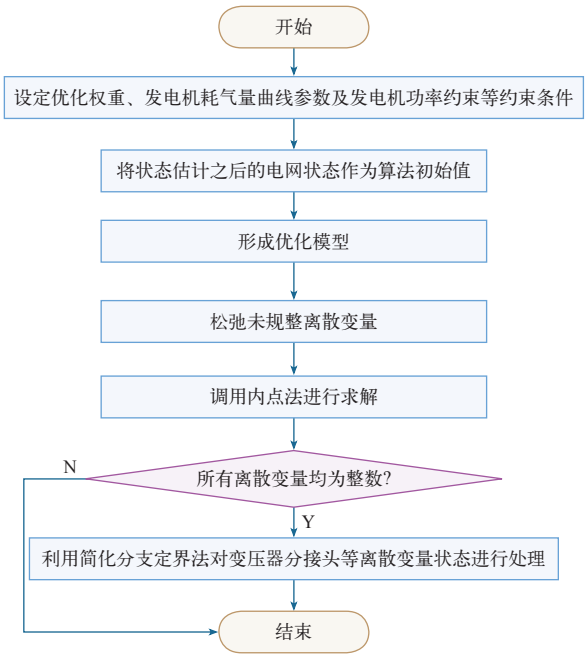


图5　智能功率调度流程图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 一体化智能监测系统的实施与应用

3.1 一体化智能监测系统的实施

一体化监控中心的系统架构主要包括：实时同步数据平台，电网模型平台，在线潮流、稳定性分析平台；在对电网实现安全监控的基础上，在按规定保证电网的频率和电压稳定的前提下，通过调度自动化的手段实现电网的经济调度，以达到降低损耗、节省能源，多发电、多供电的目的。调度管理依据来源于现场设备运行的实际状况。调度员根据电网中各机组的运行实时数据，调整各机组在电网中的实际出力情况。

系统组成包括支撑平台服务器、实时数据服务器、高级分析服务器、操作站、与EMS系统等之间的交换机及与外网之间通信等。支持平台服务器主要完成电网拓扑分析、状态估计、多目标智能功率调度和研究态分析等功能；实时数据服务器则主要从EMS数据服务器映射到本地数据库，并为各个分析模块提供数据支撑；高级分析服务器则提供性能监测、在线紧急控制和动态评估等高级应用功能，并实现与系统操作站（人机界面）之间的数据交换。

3.2 一体化智能监测系统的应用

一体化智能监测系统工程样机已应用在渤海某油田群电网，该油田包括7座新建平台，其中含2座中心平台CEPA、CEPB。CEPA上设1座主电站，为2台现场功率12 MW燃气轮发电机，CEPB上设1座主电站，为3台现场功率12 MW燃气轮发电机，2座中心平台上的2个主电站通过有载调压变压器升压后再经1条30.6 km、35 kV及3×240 mm^{2}海底电缆进行电力组网，共享电站备用系数。该油田配置的一体化智能监控系统硬件框架图如图6所示，在一体化智能监控系统投运之后，对该系统的核心功能进行了现场试验验证。

（1）动态评估

现以2014年7月21日上午10：39：30的数据为基础，对该电网状态进行动态评估，动态评估结果

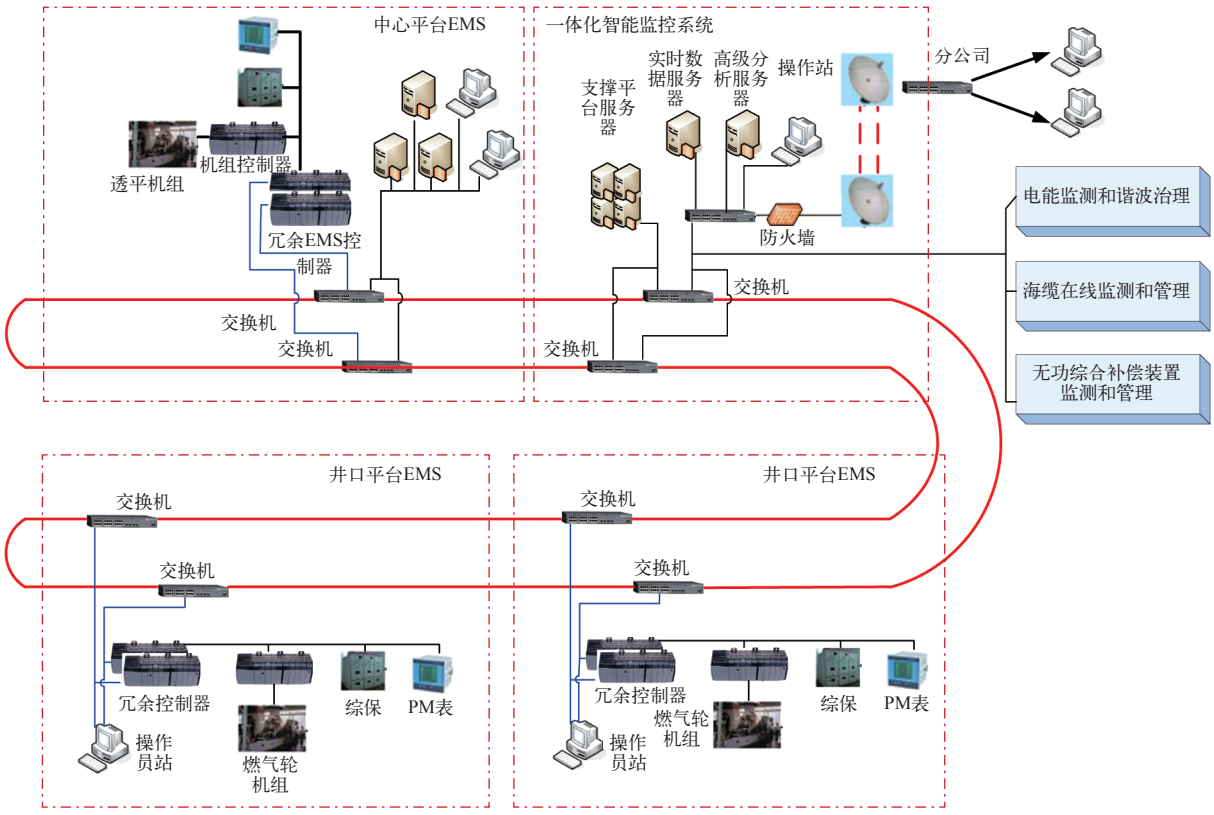


图6 一体化智能监控系统组成图

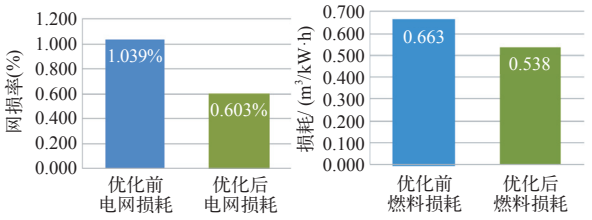
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如图7所示，左侧显示不稳定故障的最大相角，右侧则显示具体的故障名称。在对各种故障进行扫描后，系统得出以上11种不稳定的故障。对于单相短路（带重合闸）故障，电网能快速恢复稳定状态，而对于其他故障类型如发电机无故跳闸、海缆三相故障等，若不采取切机切负荷等措施，电网将不能恢复到稳定运行的状态。电网运行人员可根据此结果来制定相应的预防措施。

图7　动态评估结果

（2）多目标智能功率调度

将电网优化权重设置为70∶10∶20（网损率∶电压偏差∶发电耗气量）情况下，系统通过调节电网内有载调压变压器分接头、发电机有功无功输出对电网进行了调度优化，优化前后的指标如图8所示，主干电网网损率从1.039%降低至0.603%，天然气损耗从0.663 m^3/kW·h降低至0.538 m^3/kW·h。



（a）优化前后电网损耗　　（b）优化前后燃料损耗

图8　智能功率调度优化结果

4　结束语

先进的智能监控系统是海上油田群智能电网运行与控制的“大脑”，是保障电网稳定、经济运行的关键。在陆地大电网智能电网建设经验基础上，根据海上油田及电网特点，结合现有EMS/SCADA系统，首次提出、研发了海上油田群电网一体化智能监控系统，是现有油田群电网信息系统的全面提升，集电网监测、预警、优化及控制于一体，具有分析模型化、数据信息化、接口标准化、决策最优化和系统智能化等特点。目前该系统已研制工程样机并得到了示范应用，效果良好。

海上油田群电网一体化智能监控系统能有效提高海上油气田电网的供电可靠性、稳定性与经济性，可广泛应用于包含发电、输配电及用电等环节的配电网中，尤其适应于分布式联网发电孤岛电网，如海上油田电网等。根据目前示范工程的应用情况表明，该系统可推广应用在其他海上油田群电网，创造的经济效益可达数亿元。同时，该系统也可为海岛孤岛新能源孤岛电网控制系统提供借鉴与参考。

参考文献

[1] 张继芬，胡鹏，等．海上石油平台电力组网及其EMS系统设计与实现 [J]．电力勘测与设计，2008 (2)：57-60．

[2] 李强，李鑫，魏澈．海上油气田群电力组网技术 [J]．中国造船，2011 (增刊1)：218-223．

[3] 丁银，丁明，等．微电网系统CIM/XML模型研究 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (9)：37-42．

[4] 刘海璇，吴福保，等．微电网能量管理系统中的公共信息模型扩展 [J]．电力系统自动化，2012，36 (6)：45-51．

[5] 丁平，徐友平，等．大电网在线动态安全评估系统电网模型特性分析 [J]．电力系统保护与控制，2013，41 (19)：132-139．

[6] 徐泰山，许剑冰，等．互联电网预防控制和紧急控制在线预决策系统 [J]．电力系统自动化，2006，28 (7)：1-4，36．

[7] 王艳，杨鹏鹏，等．基于曲线拟合的电力系统紧急控制切机策略研究 [J]．电气应用，2013，32 (9)：78-81．

[8] 梁睿，孙金宝，等．含分布式电源配电网的多目标最优潮流 [J]．电气应用，2014，33 (5)：22-25．

（收稿日期：2015－08－20）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net