

计及生产流程和电压与频率稳定性的孤立电网 灾后恢复策略

王邦彦^{1,2},王锡凡^{1,2},王志维^{1,2},周沫³,高嘉文³,韩震焘³

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 西安交通大学 陕西省智能电网重点实验室,
陕西 西安 710049;3. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院,辽宁 沈阳 110017)

摘要:用于工业园区、油气开发等的孤立电力系统广泛存在,其组网脆弱、灾后完全停产等问题严重影响了系统生产、运行效率。针对孤立电网的灾后恢复策略开展了研究。以海上油气开发为例建立了系统生产全流程模型,提出了负荷恢复度的概念并建立了产量与各类负荷关系的多元函数。针对孤立电网负荷恢复过程的电压与频率暂态稳定性进行了分析,将分析结果以构建约束条件的方式纳入优化模型。提出了用于确定负荷恢复顺序的系统灾后恢复模型并应用贪心算法进行求解。算例结果验证了所提出的模型及方法的有效性。

关键词:孤立电网;灾后负荷恢复;生产流程;电压与频率稳定性;海上石油平台

中图分类号:TM732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202311023

0 引言

孤立电网(下文简称孤网)通常指脱离大电网独立运行的小容量电网。一般而言,最大单机容量小于电网总容量的8%的电网称为大电网;否则称为小网^[1]。孤网系统在普通民用电、工业生产、可再生能源就地消纳等方面正在发挥越来越重要的作用^[2]。最常见的孤网类型有一体化工业园区孤网^[3]、海上油田群孤网^[4]、地方区域电网等。孤网相对于常规大电网,具有电网容量小、备用容量少、负荷波动大、机组调节频繁,以及负荷波动对电网冲击大、对保护及自动装置要求灵敏等特点^[5]。

上述孤网系统存在明显弱点,但往往主要承担着工业生产等重要任务,所供应的负荷也往往是大量电动机类的旋转负荷。考虑到常规大电网在应对极端天气等灾害的预测和防护能力已存在不足^[6],此类孤网在地震、海啸、台风等特殊事件下,系统短时间内完全崩溃且停电停产的可能性将更大,面临更大的运行风险。孤网在此类“低概率、高损失”特殊事件下受到的影响主要通过灾后恢复过程进行反映。电力系统从崩溃、恢复部分负荷到恢复全部产能的过程被称为灾后恢复过程或黑启动过程。考虑到系统的运行特性和生产流程的相关性^[7],孤网的灾后恢复需要一定的客观条件和持续时间,会产生明显的生产损失,值得着重分析并构建预案。

对于一般电网,灾后恢复过程可分为发电机组的自启动、电网结构的重新调整、负荷的恢复3个阶段。部分研究通过对灾后恢复过程的建模,以最小化用户停电损失为目标提出了混合整数线性规划^[8]、鲁棒优化^[9]等求解方法。对于极端自然灾害可采用网络栅格法对破坏情况进行更加细致的模拟,并建立马尔可夫状态转移模型进行描述^[10]。为了因地制宜地提升系统抵御灾害的能力,可从规划角度出发,考虑兼顾提升系统弹性和系统运行经济性建立多目标加权模糊规划问题^[11]。在负荷恢复过程中,网络重构可以逐步恢复灾后形成的孤岛系统,在重构过程中需考虑网络约束和系统运行约束^[12-13]。分布式电源在负荷恢复过程中也可承担形成独立微电网的重要作用^[14]。部分研究考虑了三相不平衡潮流进行更加精确、复杂的建模分析^[14]。此外,各类智能算法,例如遗传算法^[15]、禁忌搜索算法^[16]、萤火虫算法^[17]等也被广泛应用。

孤网系统中,各类扰动对系统稳定性的破坏更严重,由扰动造成的系统稳定性威胁比传统大电网更需要关注和警惕^[18]。因此,在负荷恢复过程中需要严格关注系统的电压与频率稳定性,防止保护装置动作或系统崩溃。时域仿真是目前暂态稳定分析的主要方法^[19],文献[20]以节点方程的电磁暂态仿真为基本框架,对分布式发电微电网系统进行了暂态仿真;文献[21]使用PSCAD软件对我国典型海上油田群电力系统的各元件与网络进行了完整建模。但是,时域仿真法和传统的优化方法难以结合在一起。部分研究建立了频率响应率概念,描述负荷突变导致系统频率失稳的阈值,依此建立最大频率响应率约束以保证负荷恢复过程中的频率稳定性^[22]。

收稿日期:2023-03-05;修回日期:2023-09-19

在线出版日期:2023-11-24

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5100-202256029A-1-1-ZN)

Project supported by the Science and Technology Project of Headquarters of SGCC(5100-202256029A-1-1-ZN)

此外,大量研究在优化过程中进行了逐次暂态仿真以校验目前方案的可行性^[14,23],或者进行了暂态仿真后校验^[24]。

现有研究已针对传统电力系统的灾后恢复做了大量深入的工作,但对于解决海上油田群等孤网系统的灾后恢复问题仍存在不足:多针对机组数量多、支撑能力强的复杂系统,对于脆弱的孤网研究较少;多针对电力系统进行负荷损失计算,对于实际生产线的多设备运行和工艺流程建模较少;多建立固定的简单约束反映稳定性问题,然后进行系统最优潮流分析,难以考虑孤网中大负荷投切后的电压、频率变化过程。

综上所述,本文针对因事故或者特殊原因导致的完全停电停产的孤网系统,分析其产能与负荷的定量关系,并且通过动态特性仿真构建电压与频率稳定性约束,建模求解得到经济最优的恢复策略。由于生产流程建模在不同系统中的差异较大,需要具体分析,本文将最具有典型性的海上油田群电力系统作为分析案例。

1 生产流程与负荷建模

1.1 海上石油平台生产流程

对海上油田群电力系统进行灾后恢复建模分析时,首先需要明确其生产和设备供电情况的定量关系。海上石油平台生产过程复杂,按照我国石油部门制订的标准,油田油气集输处理要做到“三脱三回收”,即原油脱水、脱气,天然气(伴生气)脱轻烃,回收天然气中的轻烃、处理后的采出水和污水中的原油^[25]。海上石油平台生产全过程是一个整体,任何一个环节的故障都会对生产产生不同程度的影响,但总体上可以将生产线分成石油流程、天然气流程、水流程3个部分。根据负荷的电压水平、负荷特征、电气位置等,将部分流程合并,得到简化的流程如图1所示。图中绿色版块代表主要大型用电设备。

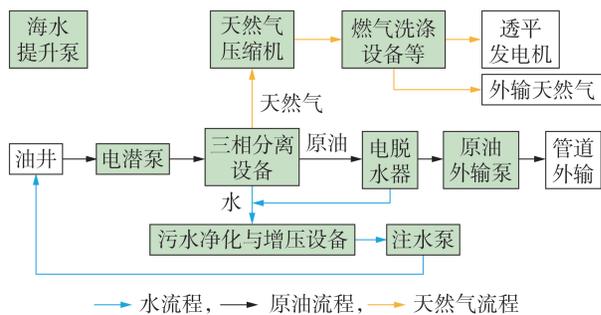


图1 海上石油平台生产全流程

Fig.1 Whole production process of offshore oil platform

在各流程中,设备之间是串联关系,所以石油总产量与各用电设备的产能的关系符合“木桶原理”。对于特定生产效率而言,必须所有设备都处于开机

状态且达到特定功率才可以顺利生产。

1.2 海上石油平台负荷拟合

对于特定海上油田群而言,在整个开采周期的不同时段内,生产单位体积石油所需要的电能是不断变化的。耗电量与油井提液含油量、油井压力等诸多因素相关。为简化分析,仅讨论短时间周期内的石油平台耗电量特性,可忽略外界影响因素。根据案例石油平台某生产线在不同产能情况下的日用电量实际数据,通过拟合得到日平均电力负荷与石油产量关系见附录A图A1。图中:红色的数据点包含公共负荷;蓝色的数据点不包含公共负荷,其电力负荷仅用于石油生产(简称生产负荷);2条拟合直线基本平行,说明公共负荷基本不变。案例石油平台的石油日产量与日均电力负荷的关系如式(1)所示。

$$P_L = k_p D \quad (1)$$

式中: P_L 为日均电力负荷,单位为kW; k_p 为系数,其大小由石油平台自身的特性决定,本案例中为11.543; D 为石油产能,单位为桶/d。此外,每条生产线的公共负荷平均大小为6.2 MW。

1.3 多电力设备恢复动态优先级分析

常规大电网的负荷恢复一般按照负荷的重要程度安排恢复顺序,但是海上油田群电力系统的用电设备几乎均为生产负荷,没有固定的优先级。此外,该系统用电特性短时间内不变,功率与石油产能成正比。因此,海上油田群电力系统的负荷恢复没有优先级参考,需以石油产能恢复为唯一指标。

基于上述前提,研究所有用电设备功率与石油生产之间的综合关系。平台同一类别的负荷较多,且单台设备的生产效率、功率皆相同,平台可以依据实际生产需要而开关相应设备。故可以认为针对某条特定的生产线,其产能由作为生产效率“短板”的某类设备决定。利用负荷系数描述各类用电设备在石油生产过程中的负荷占比,如式(2)所示。

$$k_e = \sum_{j=1}^{N_e} P_{e,j} / P_s \quad (2)$$

式中: k_e 为第 e 类设备的负荷系数; j 为生产线上特定类别用电设备的编号; N_e 为第 e 类设备的总数量; $P_{e,j}$ 为第 j 台第 e 类设备的额定功率; P_s 为生产线设备总额定功率。详细的设备情况及负荷系数计算结果分别见附录A表A1、A2。

为了找出在所有用电设备中制约产量的设备种类,定义负荷恢复度 $\alpha_{e,t}$ 来表示 t 时段第 e 类设备在该生产线上的恢复程度,并引入0-1变量 $y_{e,j,t}$ 表示 t 时段第 j 台第 e 类设备是否被恢复,其取值为1、0分别表示被恢复、未被恢复,如式(3)所示。

$$\alpha_{e,t} = \sum_{j=1}^{N_e} P_{e,j} y_{e,j,t} / \sum_{j=1}^{N_e} P_{e,j} \quad (3)$$

综合上述分析可知,石油生产量取决于负荷恢

复度最低的一类设备。由式(1)~(3)可推导得到每个时段内石油产能与最低负荷恢复度的关系式为:

$$D_t = \frac{P_s}{k_p} \min_{e=1,2,\dots,N} \alpha_{e,t} \quad (4)$$

式中: D_t 为 t 时段石油产能; N 为设备类型总数。在负荷恢复度概念提出后,负荷系数和各类负荷的额定容量实际上已被隐含在负荷恢复度的计算中。

2 系统动态特性模型

2.1 时域仿真平台

灾后恢复过程中,孤网运行面临稳定性问题的挑战,主要为电压和频率稳定性。为了研究孤网各母线在负荷恢复时的动态特性以及影响各母线电压与频率波动的因素,使得现有孤网的负荷恢复过程中各处电压与频率都能够满足系统生产、运行标准,本文对海上油田群电力系统在负荷恢复时具体的频率与电压动态特性进行了时域仿真研究,采用的仿真平台为PSCAD/EMTDC。暂态仿真首先建立了包括励磁系统、原动机及其调速系统的发电机模型,其中励磁模型详见附录A图A2。发电机参数及励磁系统参数分别如附录A表A3、A4所示。

2.2 系统负荷动态建模

考虑到海上石油平台的负荷种类多样、构成复杂,在不同系统运行情况下负荷特性会发生明显变化,有必要针对系统的负荷进行详细建模。海上石油平台的负荷包含照明、加热等静态负荷和电动机等旋转负荷2类。

对于照明、加热等静态负荷,当系统频率和电压的变化在一定范围内时,可用代数方程或曲线来表示负荷的有功和无功功率的变化特性。负荷静态特性的幂函数模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_L = P_{L0} (V_L/V_{L0})^{p_v} (\omega/\omega_0)^{p_\omega} \\ Q_L = Q_{L0} (V_L/V_{L0})^{q_v} (\omega/\omega_0)^{q_\omega} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{L0} 、 Q_{L0} 、 V_{L0} 和 ω_0 分别为扰动前稳定运行时的负荷有功功率、无功功率、负荷母线电压和角速度, P_L 、 Q_L 、 V_L 和 ω 分别为其实际值; p_v 和 p_ω 分别为有功功率的电压特性指数和频率特性指数; q_v 和 q_ω 分别为无功功率的电压特性指数和频率特性指数。

负荷静态特性的多项式模型如式(6)所示。

$$\begin{cases} P_L = P_{L0} \left[A_p \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^2 + B_p \frac{V_L}{V_{L0}} + C_p \right] \left(1 + \frac{dP_{L^*}}{df^*} \Big|_{f_0} \Delta f^* \right) \\ Q_L = Q_{L0} \left[A_q \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^2 + B_q \frac{V_L}{V_{L0}} + C_q \right] \left(1 + \frac{dQ_{L^*}}{df^*} \Big|_{f_0} \Delta f^* \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_p 、 B_p 和 C_p 分别为有功负荷中恒定阻抗负荷、恒定电流负荷和恒定功率负荷的占比,且 $A_p + B_p + C_p = 1$; A_q 、 B_q 和 C_q 分别为无功负荷中恒定阻抗负荷、

恒定电流负荷和恒定功率负荷的占比,且 $A_q + B_q + C_q = 1$; P_{L^*} 、 Q_{L^*} 分别为稳态时以 P_{L0} 、 Q_{L0} 为基准值的有功、无功功率标么值; f^* 为以工频为基准值的频率标么值。

幂函数模型和多项式模型的电压特征参数之间存在以下关系:

$$\begin{cases} A_p = 0.5p_v(p_v - 1) \\ B_p = p_v(2 - p_v) \\ C_p = 1 - A_p - B_p \end{cases} \quad (7)$$

基于上述模型,对海上油田群电力系统中的所有用电设备进行分类,从而得到每种用电设备的平均特性参数,然后根据各类用电设备在总体负荷中所占的比例进行加权,最终得到综合负荷模型。将静态负荷分为照明、电热、其他用电3类,其参数详见附录A表A5。假设有 N_L 个负荷接在同一母线上,其中第 i 个负荷成分的有功、无功功率分别为 P_i 、 Q_i ,且其静态特征系数为 $p_{v,i}$ 、 $p_{\omega,i}$ 、 $q_{v,i}$ 、 $q_{\omega,i}$,则第 i 个负荷的幂函数模型为:

$$\begin{cases} P_i = P_{i0} (V/V_0)^{p_{v,i}} (\omega/\omega_0)^{p_{\omega,i}} \\ Q_i = Q_{i0} (V/V_0)^{q_{v,i}} (\omega/\omega_0)^{q_{\omega,i}} \end{cases} \quad (8)$$

可得系统总负荷及其综合静态特征系数为:

$$P = \sum_{i=1}^{N_L} P_i, \quad Q = \sum_{i=1}^{N_L} Q_i \quad (9)$$

$$\begin{cases} p_v = \sum_{i=1}^{N_L} \rho_i p_{v,i}, & p_\omega = \sum_{i=1}^{N_L} \rho_i p_{\omega,i} \\ q_v = \sum_{i=1}^{N_L} \rho_i q_{v,i}, & q_\omega = \sum_{i=1}^{N_L} \rho_i q_{\omega,i} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ρ_i 为第 i 个负荷的容量所占比例; P 为有功功率; Q 为无功功率。

此外,根据表A5及式(7)可计算得出静态负荷的多项式模型,详见附录A表A6。

动态负荷以感应电动机模型为例,分为4类:工业小电动机(4~150 kW)、工业大电动机(大于150 kW)、空调综合电动机(电动机名带有“空调”)、其他电动机(小于4 kW)。根据海上油田群电力系统的动态负荷比例,基于感应电机模型建立一个反映动态负荷平均水平的负荷模型,采取与式(10)相似的加权平均方法得到综合动态特征参数,详见附录A表A7^[26]。

至此,海上油田群电力系统的发电机、静态负荷、动态负荷均在仿真平台中完成建模。

3 考虑经济性最优的灾后恢复策略

下面建立基于生产流程的孤网经济最优恢复模型。假设在灾后恢复过程开始时,所有输配电线路故障都完全恢复并且线路都已合闸,但用电设备的开关都处于断开的状态。且电网内的通信网络是可

用的,操作员可远程控制各个开关。

3.1 目标函数

系统恢复过程中,目标是在平台完全恢复生产前尽可能减少因石油减产造成的经济损失,如式(11)所示。

$$\min \left(D_0 T - \sum_{t=1}^{N_t} D_t \Delta T \right) \quad (11)$$

式中: D_0 为灾前石油生产效率; T 为总恢复时间; N_t 为总时段数; ΔT 为每一时段的时长。

3.2 常规约束条件

在整个灾后恢复过程中,需要考虑恢复负荷量的大小、燃气透平机组的出力特性,以及网络的安全稳定运行要求等多种约束条件的限制。

3.2.1 负荷约束

利用0-1变量 $y_{i,j,t}$ 表示负荷的恢复状态,建立节点接入总负荷的约束,如式(12)所示。

$$p_{m,t} = \sum_{(e,j) \in B(m)} P_{e,j} y_{e,j,t} \quad (12)$$

式中: $p_{m,t}$ 为节点 m 在 t 时段的负荷功率; $B(m)$ 为节点元件集合。

3.2.2 燃气透平机组出力约束

利用0-1变量 $y_{g,t}^g$ 表示 t 时段第 g 台燃气透平机组的发电状态(取值为1、0分别表示运行、未运行),建立燃气透平机组输出有功及无功的约束,如式(13)~(15)所示。

$$P_{g,\min}^g y_{g,t}^g + P_g^{\text{d}} \leq p_{g,t}^g \leq P_{g,\max}^g y_{g,t}^g - P_g^{\text{u}} \quad (13)$$

$$0 \leq q_{g,t}^g \leq Q_{g,\max}^g y_{g,t}^g \quad (14)$$

$$p_{m,t}^g = \sum_{g \in B(m)} p_{g,t}^g \quad (15)$$

式中: $P_{g,\min}^g$ 、 $P_{g,\max}^g$ 分别为第 g 台燃气透平机组的最小、最大有功出力; $Q_{g,\max}^g$ 为第 g 台燃气透平机组的最大无功出力; P_g^{u} 、 P_g^{d} 分别为第 g 台燃气透平机组的向上、向下的备用功率; $p_{m,t}^g$ 为节点 m 在 t 时段的发电机功率; $P_{g,t}^g$ 为第 g 台燃气透平机组在 t 时段的功率。为了简化模型,假设控制方式为所有开机的发电机出力相同。此外还有发电机的爬坡约束,如式(16)所示。

$$-R_g^g \Delta T \leq p_{g,t}^g - p_{g,t-1}^g \leq R_g^g \Delta T \quad (16)$$

式中: R_g^g 为第 g 台燃气透平机组的最大爬坡速度。

3.2.3 潮流约束

本文采用常见的线性潮流模型,如式(17)~(19)所示。

$$p_{m,t}^g - p_{m,t} = \sum_{n|(m,n) \in L(m)} p_{mn,t} \quad (17)$$

$$q_{m,t}^g - q_{m,t} = \sum_{n|(m,n) \in L(m)} q_{mn,t} \quad (18)$$

$$v_{m,t} - v_{n,t} = (p_{mn,t} R_{mn} + q_{mn,t} X_{mn}) / V_0 \quad (19)$$

式中: $p_{mn,t}$ 、 $q_{mn,t}$ 分别为 t 时段线路 mn 上流过的有功、

无功功率; $L(m)$ 为与节点 m 相连接的支路集; V_0 为系统的额定电压; $v_{n,t}$ 为节点 n 在 t 时段的电压; R_{mn} 、 X_{mn} 分别为线路 mn 的电阻、电抗。从安全角度考虑,流过线路的功率值应该在安全范围内,如式(20)所示。

$$p_{mn,t}^2 + q_{mn,t}^2 \leq S_{mn,\max}^2 \quad (20)$$

式中: $S_{mn,\max}$ 为线路 mn 的最大容量。

此外,在电网的恢复过程中,节点电压需限制在一定范围内以保证安全稳定运行,如式(21)所示。

$$V_0 - \Delta V \leq v_{y,t} \leq V_0 + \Delta V \quad (21)$$

式中: ΔV 为给定电压最大偏差值; $v_{y,t}$ 为节点 y 在 t 时段的电压。

3.3 电压与频率安全约束

作为一个“大机小网系统”(大机指最大单机容量大于总电网容量的8%),接入大量负荷会造成整个电网运行频率的波动。在恢复模型与恢复过程中无法解析地考虑系统的动态特性去保证系统的电压与频率稳定。本节根据第2章的研究与仿真结果,对接入负荷大小进行限制,从而保证系统的安全稳定。在特定电网结构与发电机开机情况下,可通过仿真获得在保证电压与频率安全稳定的前提下各类负荷的单个恢复接入功率上限,在负荷接入时,需以该上限值作为电压与频率安全约束,如式(22)所示。

$$\sum_m (p_{m,t} - p_{m,t-1}) \leq \Delta p_L^{\max} \quad t=2, 3, \dots, N_t \quad (22)$$

式中: Δp_L^{\max} 为特定电网结构与开机情况下可单次接入负荷上限值。

3.4 求解算法

上述优化问题本质上是特定数量的用电设备与发电机的开机顺序问题。作为优化问题,可以转换成混合整数线性规划问题,使用CPLEX等商业求解器进行直接求解。CPLEX求解可以保证全局最优解,但对于模型约束存在线性的要求,同时在模型0-1变量过多的情况下会出现维数灾问题。为满足1 min等级的时间粒度,模型的0-1变量是设备数量的100多倍,本文的小算例系统实际上已经具有一定的计算复杂度。因此,对于孤网系统灾后恢复问题,本文寻求一种不同角度的求解思路,以保证模型在未来可能应用的大规模算例和在线计算情形下的求解稳定性,同时提供强力的可扩展性。贪心算法作为一种启发式算法,时间复杂度低,求解稳定高效,且结果一般较为接近最优解。鉴于贪心算法在各类型负荷恢复问题中均有较好表现,本文采用贪心算法进行问题的求解^[27]。传统全局优化算法无法处理非线性和非凸的约束,而贪心算法可以轻松处理,因此贪心算法保证了增加复杂约束的独特可扩展性。

制定系统负荷恢复优化流程如下:首先设置包含每种待恢复的负荷的恢复度空间,每一步选择恢复度最小的负荷,同时在每一步恢复操作以后更新恢复度空间,如图2所示。

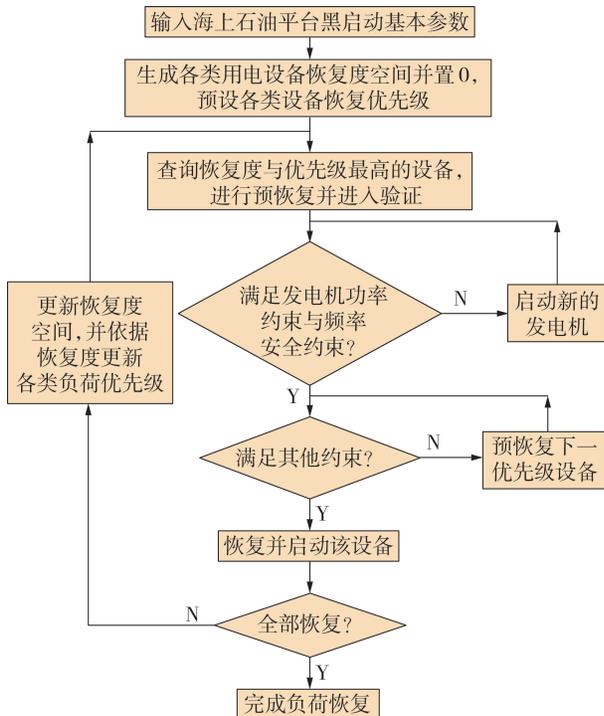


图2 系统灾后恢复与负荷恢复优化求解流程

Fig.2 Optimal solution process for system disaster recovery and load recovery optimization

4 算例分析

4.1 算例简介

本文算例平台为中国渤海某油田群电力系统,该油田群目前已经建成3个中央平台和8个井口平台,平台间用海底电缆互供电力,算例系统的拓扑、结构分别如附录A图A3、A4所示。该海上油田群电力系统没有岸电供电,也没有风电接入,仅靠自身安装的燃气透平机组供电,是典型的孤网。电网最高电压等级为35 kV,频率为50 Hz。仅有3个中央平台安装了发电机,即中央平台C₁—C₃分别装备有4、2、3台燃气透平机组,单台机组的额定有功功率均为12 430 kW。整个电力系统呈辐射状,负荷分别分布在母线18、13和14上,定义发电机所在的母线18为辐射状电网的根节点,母线13、14为顶端节点。根据石油生产实况,相对独立的生产线共有3条,不同生产线模块之间只有电力互为备用,没有生产线的联系。平台发电机装机容量与负荷水平详见附录A表A8,石油平台群与生产线1的发电机与主要用电设备情况详见附录A表A9。

4.2 频率、电压动态特性仿真结果

考虑到负荷恢复暂态过程中,大机小网、负荷突增、动态负荷多等因素对于孤网系统频率、电压稳定性的复杂影响,基于建立的系统暂态模型对其频率、电压特性进行了多次仿真,仿真中考虑的因素包括单次恢复负荷大小、负荷恢复过程中的负载率大小、

负荷恢复位置以及类型。

4.2.1 单次恢复负荷大小及负荷类型

系统典型用电设备的单台设备功率差异较大,最大可达近10倍。选取根部节点母线(母线18)与负荷所在母线(母线13、14)的电压与频率,控制其他变量不变,改变每次接入设备(静态负荷)的大小,分析单次恢复负荷大小对电压与频率的影响。恢复不同负荷水平时母线18、13的电压与频率分别如附录A图A5、图A6所示。当在各母线恢复不同负荷水平的设备时,电压和频率收到的冲击(最大电压、频率波动)有明显的变化。开关在0 s时合闸,负荷接入,电压与频率开始波动,并在3 s之后逐渐恢复平稳,母线18、13的最大电压与频率波动出现在2.1 MW负荷接入时。仿真得到的单次恢复负荷量与最大电压、频率下降量(动态过程中电压、频率最低值与开关动作之前值之差)数据详见附录A表A10。表中 ΔV 为标幺值,后同。由表可知,母线18、13的电压与频率波动结果非常接近,经拟合得到系统动态电压、频率约束分别如式(23)、(24)所示。

$$\Delta V = -0.0037 \Delta P_L^2 + 0.0162 \Delta P_L - 0.0088 \quad (23)$$

$$\Delta f = 0.0993 \Delta P_L + 0.0013 \quad (24)$$

式中: ΔP_L 为单次恢复负荷大小。

海上石油平台的负荷分静态负荷与电动机负荷2种,2种负荷的动态特性存在较大差异,下面通过仿真继续研究负荷类型对系统稳定性的影响。在母线18上分别接入一系列大小相同的2种负荷,其电压、频率变化情况如附录A图A7所示,静态负荷与感应电动机负荷接入时所在母线电压与母线波动的最大值对比如图3所示,每次负荷接入时电压与频率的波动最大值如附录A表A11所示。由图3可知,感应电动机负荷接入时,对所在母线与整个系统的电压影响明显大于静态负荷,而对频率的影响则与静态负荷基本相同,所以在负荷恢复时,要重点关注感应电动机的接入对系统电压的影响,防止出现继电保护误动作以及其他故障。

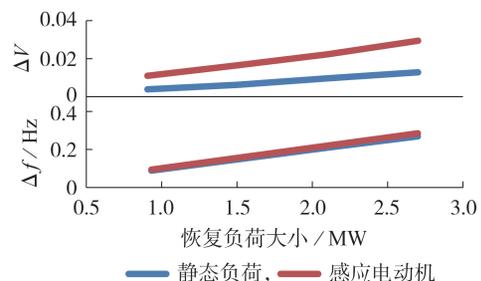


图3 静态负荷与感应电动机负荷接入时电压与频率波动最大值对比

Fig.3 Comparison of maximum value of voltage and frequency fluctuation when static load and induction motor load are connected

4.2.2 系统负载率

海上油田群电力系统在负荷恢复过程中,负载率会有较大的变化,可能会对电网的电压与频率稳定性造成影响。以生产线1为例,分别设置负载率为0.5、0.6、0.69、0.79、0.98,固定单次恢复负荷量为1.5 MW不变,仿真得到单次恢复负荷量相同情况下的最大电压、频率下降量数据如附录A表A12所示,母线18、13的电压、频率波动情况分别如附录A图A8、A9所示。根据仿真结果分析可知:负载率为0.98、0.79时,电压波动量约为0.0065 p.u.,其他负载率下的电压波动量约为0.005 p.u.,相差较小;频率下降量随负载率上升有少量下降,对于稳定性的影响较小,可认为总体保持不变。由于负载率对动态特性的影响远弱于负荷大小、负荷类型等因素,因此,在负荷恢复过程中,可认为负载率的变化对电网的动态特性几乎没有影响。

4.2.3 恢复负荷位置

海上油田群电力系统的负荷分布比较集中,负荷存在于辐射状电网的根部或者顶部节点,而放射状电网的中间节点一般没有负载与电源,仅为满足输电功能设置。通过仿真母线13、18这2个位置的负荷恢复过程,研究负荷所在位置对系统稳定性的影响。母线18接入0.9~1.8 MW电动机负荷时,母线18、13的电压与频率变化情况如附录A图A10所示,得到的最大电压、频率下降量数据如附录A表A13所示。母线13接入0.9~1.8 MW电动机负荷时,母线18、13、14的电压与频率变化情况如附录A图A11所示,得到的最大电压、频率下降量数据如附录A表A14所示。由表A13可知,当根部节点恢复时,各节点电压与频率波动情况基本相同。根节点与顶端节点负荷恢复时各母线电压与频率波动情况对比如图4所示。

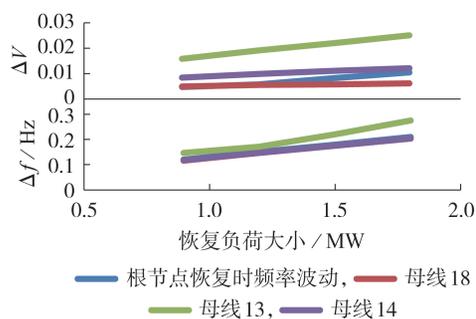


图4 根部节点与顶端节点负荷恢复时各母线电压、频率变化最大值对比图

Fig.4 Comparison of maximum value of voltage and frequency changes of each bus when loads of root and top nodes are restored

当顶端节点负荷恢复时,新接入负荷所在的母线电压下降量最大,其次为其余顶端节点,根节点电压波动最小;当顶端节点负荷恢复时,新接入负荷所

在的母线频率波动最大值最大,其余顶端节点与根节点电压波动相似。从对整个系统的电压与频率波动影响来看,顶端节点接入负荷对系统稳定性造成的影响大于根节点,这主要是新接入负荷所在的顶端节点母线的电压与频率波动造成的。

4.2.4 总体结果分析

综上所述,海上油田群电力系统恢复过程中,整体上频率波动大小与单次恢复负荷大小成正比,与低阶系统频率响应模型吻合。受其他因素影响,等量负荷接入的情况下,当在顶端节点恢复感应电动机负荷时,系统电压与频率的波动最大。另外对案例的仿真结果表明,当3台发电机全开机时,在顶端节点恢复感应电动机负荷,当接入负荷功率小于2.5 MW时,系统电压与频率的最大变化值能够满足相关规定要求。因此,式(22)中 $\Delta p_{L}^{\max}=2.5$ MW。

4.3 负荷恢复策略计算结果

假设平台群受灾停止生产,并且未有设备损坏(或已修复),根据生产实况独立地恢复3条生产线的生产。应用所提出的恢复策略,经求解获得负荷恢复顺序,并监测生产线内各负荷与发电机状态,计算得到石油的生产效率。贪心算法均在较短时间内完成优化计算,得到系统恢复方案的准优解,表现较为稳健。

以生产线1为例,其恢复过程详见附录A图A12。3条生产线的负荷恢复曲线如图5所示。根据算例结果,生产线2的总负荷与装机容量都较小,设备也比较少,仅需28 min即可完成恢复,而区域1和3都需要100 min以上才能完全恢复生产。

分析上述3条生产线的恢复曲线可以看出,在恢复初期,石油产量的开始恢复时间滞后于电力负荷的恢复开始时间,原因在于必须当所有环节的负荷均开始恢复以后才能够生产石油。而通过生产线2与生产线1、3的对比可以看出,生产线2因石油产量与负荷数量都均较少,所有环节负荷均只有1台,所以直到其恢复即将结束时,石油产量才开始恢复。而由此可以看出,随着生产线规模的扩大,负荷恢复的平均效率越高。经计算,该恢复过程中的最小石油损失为125.2桶原油,折合经济价值6.135万元。

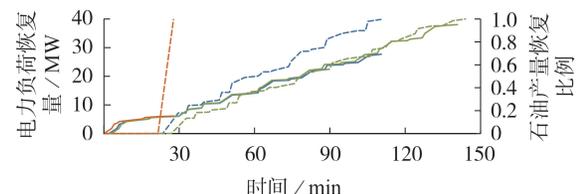


图5 生产线负荷恢复曲线图

Fig.5 Production line load recovery curve

5 结论

由于自身的大机小网等特性,孤网相较于大电网较为脆弱,在极端情况下具有较大的崩溃风险,其灾后恢复是系统运行安全性、经济性方面需要考虑的重要问题,快速的负荷恢复、有效的产能重建对孤网系统具有重要意义。本文以海上油田群电力系统为孤网案例,对其生产流程以及产能与负荷的关系进行了分析研究,建立了暂态仿真模型以分析恢复过程的稳定性,根据生产流程的特点制定了经济最优灾后恢复方案。本文所得结论如下。

1)研究了海上石油平台电力负荷对石油产量的确定关系,建立了其关系函数。分析了海上石油平台的石油生产流程,确定了石油产量与特定种类用电设备负荷水平的近似正比例关系,引入负荷恢复度的概念从而定位石油生产的“短板”设备。

2)针对海上油田群电力系统的电压与频率动态特性进行了仿真分析,在PSCAD中建立了发电机、静态负荷等元件的仿真模型,对负荷类型、负荷大小、负荷恢复位置等因素对恢复后系统各母线的电压和频率扰动的影响进行了分析,结果表明等量负荷接入的情况下,当在顶端节点恢复感应电动机负荷时,系统电压与频率的波动最大。将分析结果以约束条件的方式纳入恢复策略模型以保证负荷恢复过程的暂态稳定性。

3)基于海上石油平台的特殊生产要求,结合电压频率安全约束提出了区别于一般大电网的孤网灾后恢复策略及求解方法。该策略基于海上油田群电力系统的生产运转特性,以负荷恢复度为依据,采用贪心算法进行求解。算例结果说明,产能开始恢复的时间明显滞后于电力负荷开始恢复的时间,较大的生产线需要较长的恢复时间但产能恢复的平均效率更高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 叶婧,林涛,徐遐龄,等. 考虑稳态频率约束的含高渗透率风电的孤立电网机组组合[J]. 高电压技术,2018,44(4):1311-1318.
YE Jing, LIN Tao, XU Xialing, et al. Research on unit commitment considering steady state frequency constraints of isolated grids with high permeability wind power[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1311-1318.
- [2] 崔挺. 带电压型负荷的孤立电力系统电压和频率控制策略研究[D]. 武汉:武汉大学,2015.
CUI Ting. Study of voltage and frequency control for island power systems with voltage-dependent loads[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [3] 李文帆,伍文城,李天鹭,等. 小型核电接入孤立电网的稳定分析[J]. 电力安全技术,2021,23(6):14-17.
LI Wenfan, WU Wencheng, LI Tianzhi, et al. Analysis of the stability of connecting a smart nuclear power plant to an isolated power grid[J]. Electric Safety Technology, 2021, 23(6): 14-17.
- [4] 何豪,张安安,张鹏翔,等. 基于混合无功补偿的海上石油平台群电网AVC策略[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(3):33-38.
HE Hao, ZHANG An'an, ZHANG Pengxiang, et al. AVC strategy for offshore oilfield group grid based on hybrid reactive power compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 33-38.
- [5] 何国锋,范文胜. 一体化产业园孤网稳定运行控制策略[J]. 电气技术与经济,2022(2):76-79.
HE Guofeng, FAN Wensheng. Control strategy for stable operation of isolated network in integrated industrial park[J]. Electrical Equipment and Economy, 2022(2): 76-79.
- [6] 刘瀚琛,王冲,鞠平,等. 计及统一潮流控制器的电力系统双层协调弹性调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(4):159-167.
LIU Hanchen, WANG Chong, JU Ping, et al. Bi-level coordinative resilience dispatching of power system considering unified power flow controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 159-167.
- [7] 张航,王秀丽,张启文,等. 计及生产指标的海上油田群电力系统可靠性评估[J]. 电网技术,2021,45(2):649-656.
ZHANG Hang, WANG Xiuli, ZHANG Qiwen, et al. Reliability evaluation of offshore oil power system considering production indexes[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 649-656.
- [8] 杨智超,孙磊,丁明. 计及关键恢复路径的机组启动次序优化策略[J]. 电力建设,2019,40(10):28-35.
YANG Zhichao, SUN Lei, DING Ming. Optimization strategy for start-up sequence of generation units considering critical restoration paths[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(10): 28-35.
- [9] 孙磊,刘伟佳,林振智,等. 计及线路投运风险的电力系统恢复路径优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):75-82,95.
SUN Lei, LIU Weijia, LIN Zhenzhi, et al. Determination of optimal restoration paths for power systems considering failure risk of restoring transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 75-82, 95.
- [10] 齐世雄,王秀丽,邵成成,等. 极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力分析[J]. 电网技术,2019,43(1):41-51.
QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Resilience analysis of integrated electricity and natural gas energy system under extreme events[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 41-51.
- [11] 齐世雄,王秀丽,邵成成,等. 计及弹性恢复的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 中国电力,2019,52(6):19-26.
QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Multi-objective optimal dispatch of district integrated energy system considering resilience[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 19-26.
- [12] 李长城,和敬涵,王颖,等. 考虑分布式电源支撑作用的输配电系统协同恢复方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):112-119.
LI Changcheng, HE Jinghan, WANG Ying, et al. Coordinated restoration of transmission and distribution systems considering DG support[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 112-119.
- [13] 刘菲,林超凡,陈晨,等. 考虑分布式新能源动态不确定性的配电网灾后时序负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):159-167.
LIU Fei, LIN Chaofan, CHEN Chen, et al. Post-disaster time-series load restoration method for distribution network considering dynamic uncertainty of distributed renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 159-167.
- [14] XU Y, LIU C C, SCHNEIDER K P, et al. Microgrids for

- service restoration to critical load in a resilient distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 426-437.
- [15] 孙润稼,朱海南,刘玉田. 基于偏好多目标优化和遗传算法的输电网架重构[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(5): 17-23.
SUN Runjia, ZHU Hainan, LIU Yutian. Transmission network reconfiguration strategy based on preference multiobjective optimization and genetic algorithm[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2019, 49(5): 17-23.
- [16] 李新桥. 基于禁忌搜索算法的配电网重构研究[D]. 西安:西安石油大学, 2020.
LI Xinqiao. Research on reconfiguration of distribution network based on tabu search algorithm[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [17] EL-ZONKOLY, MOHAMED A. Renewable energy sources for complete optimal power system black-start restoration[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(6): 531-539.
- [18] 黄业华,戴国华,王建丰. 锦州25-1海上油田群电网安全稳定分析及管理对策[M]. 大连:大连海事大学出版社, 2015: 26-32.
- [19] 李亚楼,张星,胡善华,等. 含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 33-42.
LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhua, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 33-42.
- [20] 李鹏,王成山,黄碧斌,等. 分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究:(一)基本框架与仿真算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 33-39.
LI Peng, WANG Chengshan, HUANG Bibin, et al. Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(1): basic framework and algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 33-39.
- [21] 熊昌. 海上石油平台电力系统动态特性的研究[D]. 西安:西安交通大学, 2021.
XIONG Chang. Research on the dynamic characteristics of the power system of offshore oil platforms[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2021.
- [22] CHEN Bo, CHEN Chen, WANG Jianhui, et al. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6793-6805.
- [23] XU Yin, LIU C C, WANG Zhiwen, et al. DGs for service restoration to critical loads in a secondary network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 435-447.
- [24] HUANG Gang, WANG Jianhui, CHEN Chen, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4451-4463.
- [25] 贺风云,周彦霞. 采油工艺与油气集输[M]. 北京:石油工业出版社, 2013: 32-135.
- [26] 汤涌,张红斌,侯俊贤,等. 考虑配电网的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
TANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. A synthesis load model with distribution network[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 34-38.
- [27] 于文鹏,刘东,翁嘉明. 含分布式电源的配电网供电恢复模型及改进贪婪算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 23-30.
YU Wenpeng, LIU Dong, WENG Jiaming. A power restoring model for distribution network containing distributed generators and improved greedy algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 23-30.

作者简介:

王邦彦(1998—),男,博士研究生,通信作者,研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性(E-mail: 3120104101@stu.xjtu.edu.cn);

王锡凡(1936—),男,中国科学院院士,教授,博士生导师,IEEE Life Fellow,主要研究方向为电力系统分析、规划及电力市场(E-mail: xfwang@mail.xjtu.edu.cn);

王志维(1998—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性(E-mail: pirlol203@stu.xjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Post-disaster recovery strategy of isolated power grid considering production processes along with voltage and frequency stability

WANG Bangyan^{1,2}, WANG Xifan^{1,2}, WANG Zhiwei^{1,2}, ZHOU Mo³, GAO Jiawen³, HAN Zhentao³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Institute of Economics and Technology of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110017, China)

Abstract: Isolated power systems are widely used in industrial parks, oil and gas development, etc. The problems such as fragile networking and complete shutdown after disasters seriously affect the production and operating efficiency of the systems. The post-disaster recovery strategy of isolated power grid is studied. The whole production process model of system is established by taking offshore oil and gas development as an example, the concept of load recovery degree is proposed, and the multivariate function of the relationship between production and various loads is established. Then, the transient stability of voltage and frequency during the load recovery process of the isolated power grid is analyzed, and the analysis results are incorporated into the optimization model by constructing constraints. A post-disaster recovery model for determining the load recovery sequence is proposed and solved by the greedy algorithm. Case results verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: isolated power grid; post-disaster load recovery; production process; voltage and frequency stability; offshore oil platform

附录 A

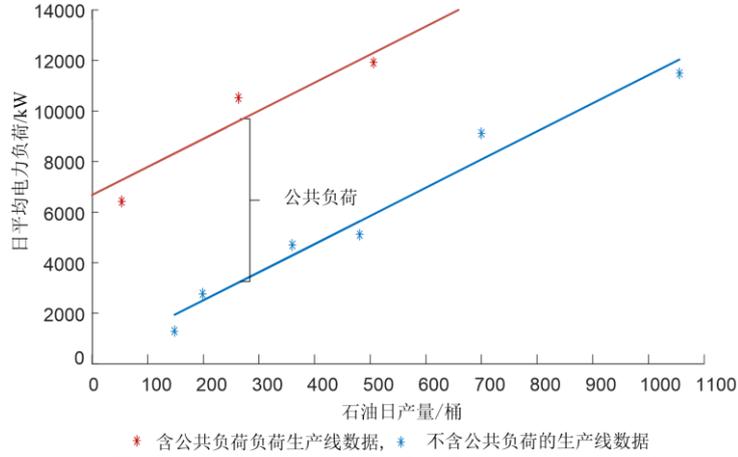


图 A1 案例石油平台石油日产量与总电力负荷关系
Fig.A1 Relationship between daily oil production and total power load of case oil platform

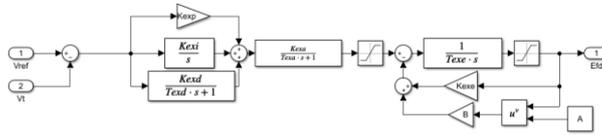


图 A2 励磁系统模型
Fig.A2 Model of excitation system

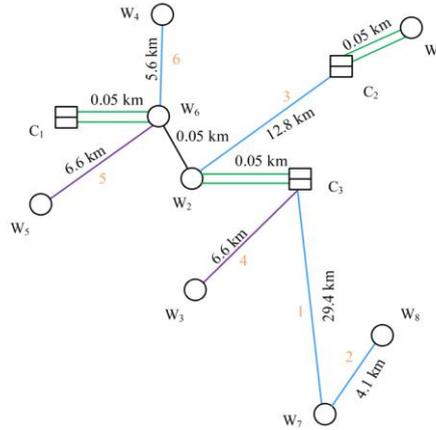


图 A3 算例系统拓扑
Fig.A3 Topology of case system

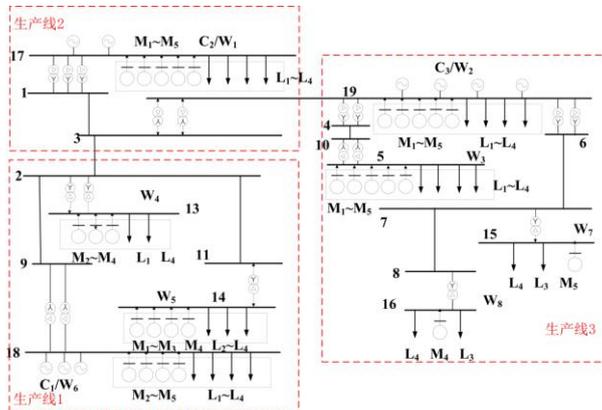


图 A4 算例系统结构
Fig.A4 Structure of case system

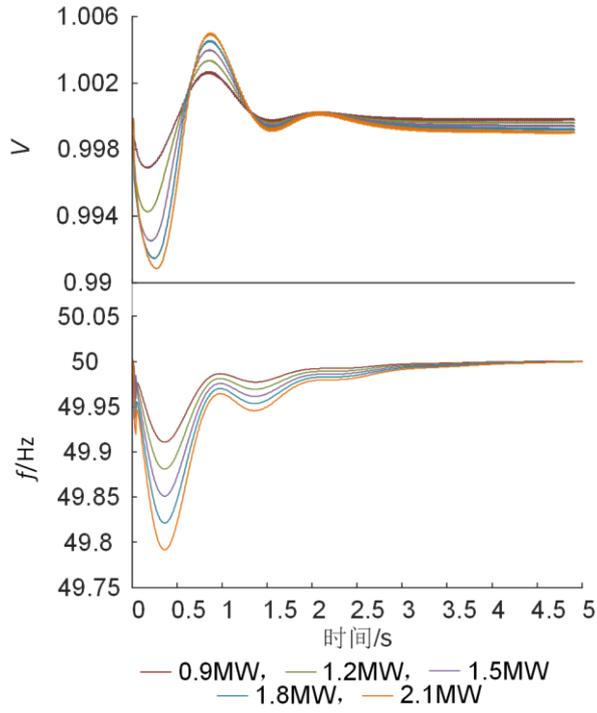


图 A5 单次恢复不同负荷水平时母线 18 的电压、频率波动

Fig.A5 Voltage and frequency fluctuations of Bus 18 under different single load recovery levels

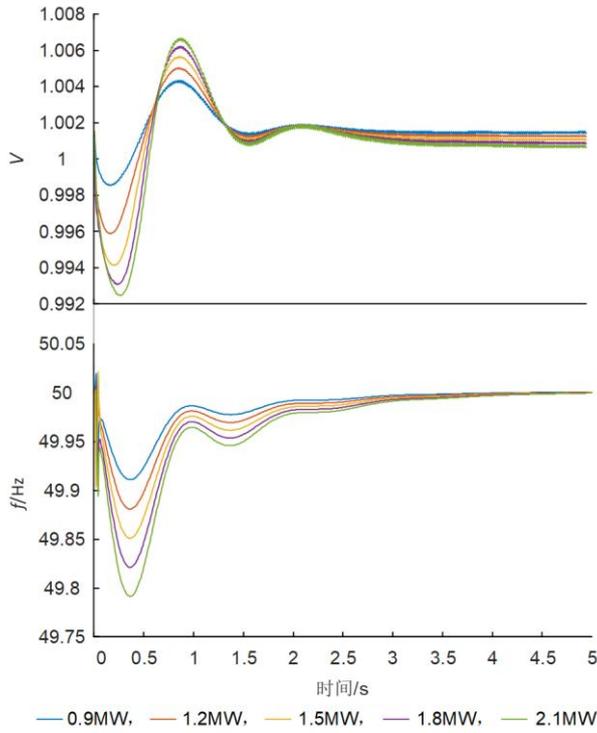


图 A6 单次恢复不同负荷水平时母线 13 的电压、频率波动

Fig.A6 Voltage and frequency fluctuations of Bus 13 under different single load recovery levels

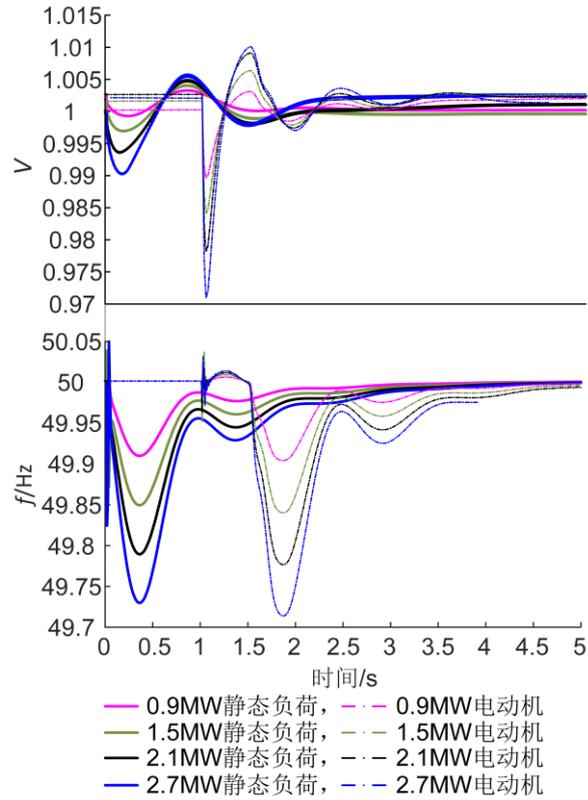


图 A7 不同类型负荷恢复时的电压、频率波动

Fig.A7 Voltage and frequency fluctuations when different types of loads are restored

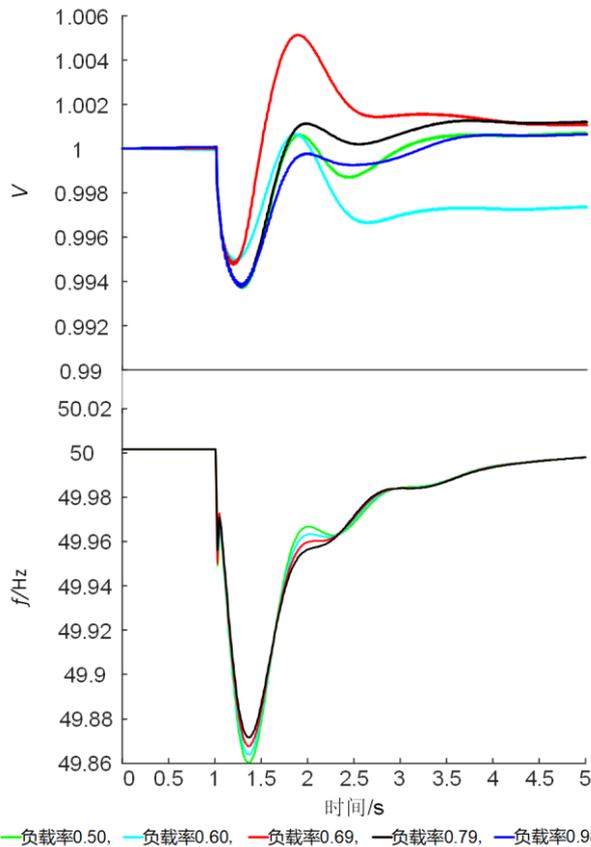


图 A8 不同负载率下负荷恢复过程电压、频率波动曲线 (母线 18)

Fig.A8 Voltage and frequency fluctuation curves of load recovery process under different load rates (Bus 18)

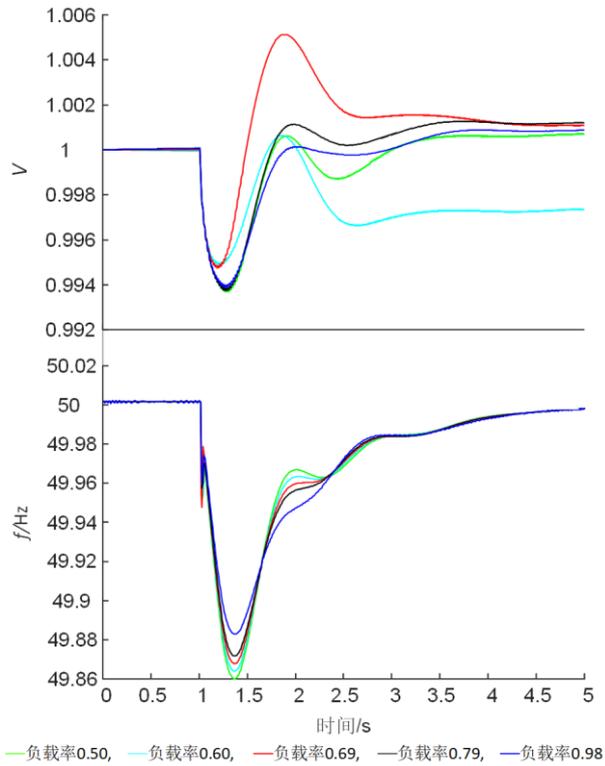


图 A9 不同负载率下负荷恢复过程电压、频率波动曲线 (母线 13)

Fig.A9 Voltage and frequency fluctuation curves of load recovery process under different load rates (Bus 13)

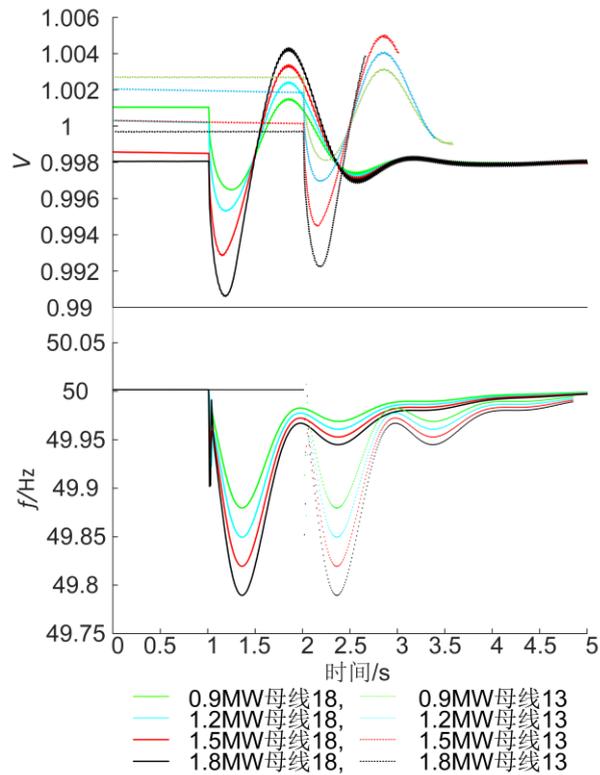


图 A10 根节点恢复负荷时各母线电压、频率波动

Fig.A10 Voltage and frequency fluctuation diagram of each bus when load of root node is restored

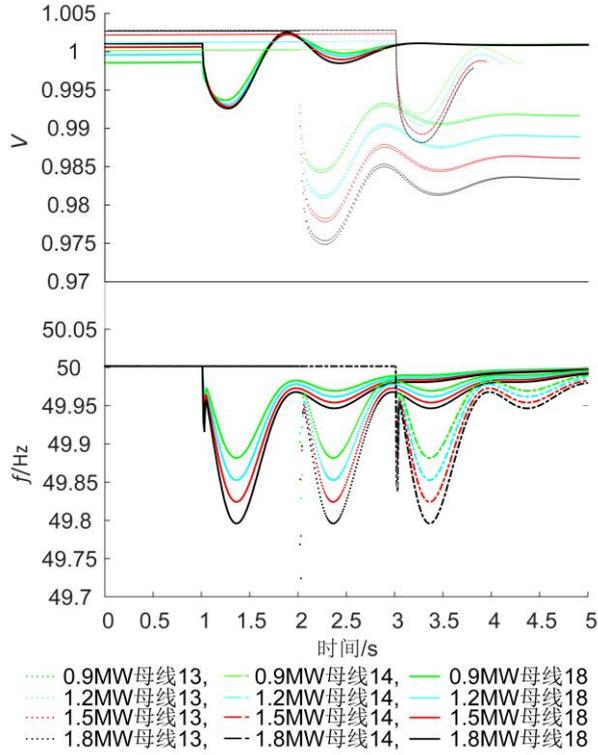


图 A11 顶部节点恢复负荷时各母线电压、频率波动

Fig.A11 Voltage and frequency fluctuation of each bus when load of top node is restored

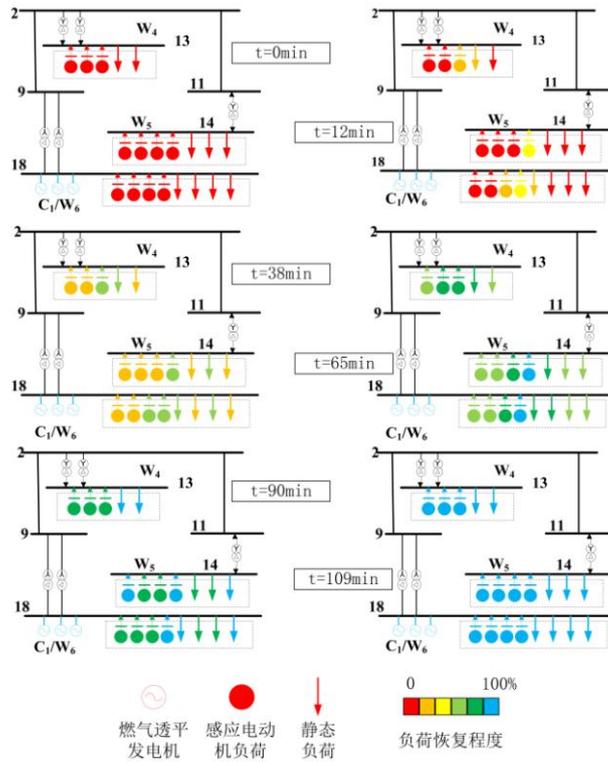


图 A12 生产线 1 负荷恢复过程示意图

Fig.A12 Schematic diagram of the load recovery process of production line 1

电力自动化设备

表 A1 海上石油平台用电设备编号

Table A1 Number of electrical equipment for offshore oil platforms

用电设备	负荷类型	类别编号	用电设备	负荷类型	类别编号
电潜泵	电动机	1	三相分离设备	静态负荷	6
石油外输泵	电动机	2	电脱水器	静态负荷	7
天然气压缩机	电动机	3	燃燃气洗涤设备	静态负荷	8
注水泵	电动机	4	污水净化设备	静态负荷	9
海水提升泵	电动机	5			

表 A2 各类用电设备负荷系数

Table A2 Load factor of various electrical equipments

用电设备	负荷系数	用电设备	负荷系数
电潜泵	0.066	三相分离设备	0.079
石油外输泵	0.133	电脱水器	0.026
天然气压缩机	0.388	燃燃气洗涤设备	0.025
注水泵	0.232	污水净化设备	0.028
海水提升泵	0.022		

表 A3 发电机参数

Table A3 Parameters of generator

参数	参数值	参数	参数值
X_d' (unsat/sat)	0.25/0.227	功率因数	0.8
X_i	0.109	视在功率/ kV · A	15539
X_q'' (unsat/sat)	0.256/0.226	额定频率/ Hz	50
X_d'' (unsat/sat)	0.171/0.15	额定电压/ V	6300
T_d'	0.90s	惯性常数/ s	1.03
T_a	0.29	额定转速/ rpm	1500
T_{d0}'/s	8.08	X_q	0.684
T_d''/s	0.026	X_d	1.56
T_{q0}''	0.10	X_2	0.197
T_{q0}'	0.67	X_0	0.056

表 A4 励磁系统参数

Table A4 Parameters of excitation system

参数	参数值	参数	参数值
K_{exd}	5	A	0.273
K_{exi}	25	B	0.00154
K_{exe}	1	T_{exe}	0.18s
K_{exa}	1	T_{exa}	0
K_{exp}	30		

表 A5 静态负荷幂函数模型参数

Table A5 Parameters of static load power function model

静态负荷	p_v	p_w	q_v	q_w
照明	1	1	3	-2.8
电热	2	0	0	0
其他用电	0.87	0.96	2.84	-2.77

表 A6 静态负荷多项式模型相关参数

Table A6 Related parameters of static load polynomial model

静态负荷	占比/%	A_p	B_p	C_p	A_q	B_q	C_q
照明	53	0	1	0	3	-3	1
电热	20	1	0	0	0	0	1
其他用电	27	-0.05655	0.9831	0.07345	2.6128	-2.3856	0.7728
综合	100	0.5147315	0.465437	0.0198315	1.305456	-1.244112	0.938656

电力自动化设备

表 A7 动态负荷综合特征参数

Table A7 Comprehensive characteristic parameters of dynamic load

动态负荷	占比/%	R_1	X_1	X_m	R_2	X_2
工业小电动机	18.68	0.031	0.1	3.20	0.018	0.18
工业大电动机	78.94	0.013	0.067	3.80	0.009	0.17
空调综合电动机	1.69	0.064	0.091	2.23	0.059	0.071
其它电动机	0.69	0.077	0.107	2.22	0.079	0.098
综合	100	0.0176659	0.073846	3.650485	0.0120092	0.1696981

表 A8 各平台负荷分布和发电情况

Table A8 Load distribution and power generation of each platform

平台名称	有功负荷/MW	额定发电容量/(MV·A)
C ₁ /W ₆	10.827	12.43×3
C ₂ /W ₁	6.12	12.43×2
C ₃ /W ₂	14.300	12.43×4
W ₄	6.303	0
W ₅	10.99	0
W ₃	10.361	0
W ₇	5.393	0
W ₈	8.106	0
总计	72.4	111.87

表 A9 海上油田群电力系统发电机与用电设备部分信息

Table A9 Partial information on generators and electrical equipment in power system of offshore oil platform group

设备	单台额定功率/MW	总数量/台	生产线 1 的设备数量/台	启动时间/min
电潜泵	0.5	10	4	1
石油外输泵	0.62	15	6	1
天然气压缩机	1.8	15	6	3
注水泵	1.5	11	4	1
海水提升泵	0.3	6	2	1
三相分离设备	0.5	12	5	5
电脱水器	0.3	8	3	5
燃燃气洗涤设备	0.4	6	2	4
污水净化设备	0.2	10	4	6
发电机	12	9	3	1

表 A10 不同大小负荷恢复时的电压、频率波动最大值

Table A10 Maximum value of voltage and frequency fluctuations when loads of different sizes are restored

接入总负荷/MW	ΔV		$\Delta f/Hz$	
	母线 18	母线 13	母线 18	母线 13
0.9	0.0027	0.0027	0.0906	0.0906
1.2	0.0054	0.0054	0.1206	0.1206
1.5	0.0071	0.0071	0.1505	0.1505
1.8	0.0081	0.0081	0.1802	0.1802
2.1	0.0088	0.0088	0.2098	0.2098

电力自动化设备

表 A11 不同种类负荷恢复时的电压、频率波动最大值

Table A11 Maximum value of voltage and frequency fluctuations when different types of loads are restored

恢复负荷量 /MW	ΔV		$\Delta f/\text{Hz}$	
	静态负荷	感应电动机	静态负荷	感应电动机
0.9	0.0034	0.0105	0.0901	0.0957
1.5	0.0057	0.0161	0.1505	0.1598
2.1	0.0091	0.022	0.2105	0.2233
2.7	0.0124	0.0292	0.2701	0.2861

表 A12 不同负载率下负荷恢复时电压、频率波动最大值

Table A12 Maximum value of voltage and frequency fluctuations when the load is restored under different load rates

负载率	ΔV		$\Delta f/\text{Hz}$	
	母线 18	母线 13	母线 18	母线 13
0.5	0.0063	0.0063	0.1399	0.1399
0.6	0.0051	0.0051	0.1361	0.1361
0.69	0.0052	0.0053	0.1323	0.1323
0.79	0.0062	0.0063	0.1283	0.1283
0.98	0.0062	0.0061	0.1172	0.1172

表 A13 根部节点不同大小负荷恢复时电压、频率波动最大值

Table A13 Maximum value of voltage and frequency fluctuations when load of root node is restored with different sizes

恢复负荷量 /MW	ΔV			$\Delta f/\text{Hz}$		
	母线 18	母线 13	母线 14	母线 18	母线 13	母线 14
0.9	0.0046	0.0046	0.0046	0.1204	0.1204	0.1204
1.2	0.0057	0.0058	0.0058	0.1505	0.1505	0.1505
1.5	0.0082	0.0082	0.0082	0.1806	0.1806	0.1806
1.8	0.0104	0.0105	0.0105	0.2105	0.2105	0.2105

表 A14 顶部节点不同大小负荷恢复时电压、频率波动最大值

Table A14 Maximum value of voltage and frequency fluctuations when load of the top node is restored with different sizes

恢复负荷量 /MW	ΔV			$\Delta f/\text{Hz}$		
	母线 18	母线 13	母线 14	母线 18	母线 13	母线 14
0.9	0.0049	0.0159	0.0083	0.1183	0.1469	0.1183
1.2	0.0055	0.0193	0.0098	0.1473	0.1714	0.1473
1.5	0.0057	0.0223	0.011	0.1759	0.2204	0.1759
1.8	0.006	0.0253	0.0121	0.2041	0.2758	0.2041