

# 基于ETAP海洋平台电力系统组网 暂态稳定性研究

卢雪松, 张晓宇, 李璇, 刘建申, 杜溪婷

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

**摘要:** 随着我国海上油气田的开发和利用, 海洋平台电力系统组网规模不断扩大, 当供电系统出现扰动后, 可能造成系统振荡, 影响正常的供电。针对海上石油平台电力系统的典型组网方式, 对可能的故障类型通过 ETAP 软件仿真研究, 分析海上平台电力系统的电磁暂态和机电暂态过程, 对电力系统的安全稳定性给出结论。从而为海洋石油工程设计人员提供了有益的参考。

**关键词:** ETAP 软件; 电力系统组网; 暂态模型; 暂态稳定性

## Research of power system networking transient stability based on ETAP

LU Xuesong, ZHANG Xiaoyu, LI Xuan, LIU Jianshen, DU Xiting

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

**Abstract:** As offshore oil and gas fields development and utilization of China, the scale of offshore oil and gas fields power system networking is gradually expanding, when there is a disturbance in the power supply system, the system may oscillate and affect normal power supply. Targeting typical grid-connecting mode of offshore oil platforms power system, on researches and simulations of probable fault types by ETAP software are carried, electromechanical transient and electromagnetic transient process as analysed for offshore platforms power system, and then analyzing conclusions are given for security and stability of power system. All these provide a useful reference for designing staffs working on the offshore oil engineering.

**Key words:** ETAP software; power system networking; transient model; transient stability

## 0 引言

随着我国海上油气田的开发和利用, 海上油气田规模在逐步扩大, 海上油气田电力系统的供电范围也在逐步扩大, 一个或几个电力系统并网组成电力系统组网。电力系统稳定是指当电力系统收到扰动后恢复正常运行的能力。如果电力系统受到小扰动后能够恢复正常运行, 称为静态稳定; 如果电力系统受到大扰动后能够恢复正常运行, 称为暂态稳定。电力系统暂态稳定分析主要是分析从扰动发生到扰动消失、电力系

统恢复稳定运行期间电力系统中发电机的机械与电气状态的变化过程<sup>[1]</sup>。

本文采用目前暂态稳定分析广泛采用的时域法进行分析。根据时域法计算得到的发电机频率、功角大小判断电力系统是否稳定, 当发电机频率或功角值大于某一特定阈值时即可判定系统失去暂态稳定。电力系统暂态稳定分析需要求解电力系统微分方程组和代数方程组的联立解, 获得各电气量的时域解<sup>[2]</sup>。因此, 在实际工程中特别是对于大型电力系统的稳定研究, 机电暂态仿

真程序（如PSSE、BPA及ETAP程序）得到了广泛的应用。

## 1 计算工具

目前，国内外常用的机电暂态仿真程序有中国版BPA电力系统分析程序、中国电科院的电力系统综合程序PSASP、美国PTI公司（现被德国西门子公司并购）的PSS/E、美国电科院的ETMSP、ABB公司的SIMPOW、美国EDSA公司的EDSA程序和美国OTI公司的ETAP程序。本文报告采用OTI公司Windows版电力电气分析、电能管理的综合分析软件系统（ETAP）7.0.0英文版。

## 2 模型建立

现代电力系统分析多以计算机为工具，因此，建立海上平台电力系统的数学模型是进行暂态稳定分析的基础。数学模型的准确性是进行准确的暂态分析的前提，海上平台电力系统暂态模型包括发电机、励磁系统、调速器以及负荷模型等<sup>[3]</sup>。首先应用相关理论知识分别建立单个元件的数学模型，进而再根据元件在整个系统之间的联系建立全系统的模型。本文结合渤海油田电力系统组网实际工程项目，建立模型如下。

### 2.1 发电机模型

海上发电机是海上平台电力系统的核心，它将自然能源转化为电能，给平台上的电气设备供电。海上平台电力系统的稳定性在不同程度上是一个使相互连接的同步发电机保持同步的问题，因此，理解海上平台发电机的特性和建立精确的模型是十分重要的<sup>[4]</sup>。

ETAP提供了5种不同的同步发电机类型来进行暂态稳定性分析，本工程发电机类型为汽轮发电机，转子类型为隐极，采用隐极发电机的次暂态模型。发电机模型的选取直接影响到暂态稳定计算结果的准确度。不同的同步发电机数学模型，其主要区别在于发电机的转子绕组数。如果固定在转子上的d轴、q轴各有两个绕组，且每一

个转子绕组有一个一阶微分方程，那么则称之为转子四阶模型。连同转子运动方程的两阶模型，整个发电机方程数为六阶<sup>[5]</sup>。如转子绕组数减少，则发电机方程组的阶数也相应减少。

#### 1) 转子运动方程

$$\frac{T_J}{\omega_0} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta M_* \quad (1)$$

式中， $T_J$ 为发电机惯性时间常数，s。

#### 2) 发电机实用模型计算公式为

$$\left. \begin{aligned} T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} &= E_{fd} - [E'_q + (x_d - x'_d)I_d + (K_G - 1)E'_q] \\ T''_{d0} \frac{dE''_q}{dt} &= -E''_q - (x'_d - x''_d)I_d + E'_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} \\ T'_{q0} \frac{dE'_d}{dt} &= -E'_d + (x_q - x'_q)I_q \\ T''_{q0} \frac{dE''_d}{dt} &= -E''_d + (x'_q - x''_q)I_q + E'_q + T'_{q0} \frac{dE'_d}{dt} \\ T_J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{P_T}{\omega} - (\psi_d I_q - \psi_q I_d) - D(\omega - \bar{\omega}_0) 2\pi f_0 \\ \frac{d\delta}{dt} &= (\omega - 1) 2\pi f_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在发电机的暂态模型中，励磁系统（AVR）、调速器（GOVERNER）是非常重要的两个控制系统，直接影响电力系统的暂态过程<sup>[6]</sup>。

### 2.2 发电机励磁器模型

励磁系统向发电机提供励磁电流，起着调节电压、保持发电机端电压或枢纽点电压恒定的作用，并可控制并列运行发电机的无功功率分配。它对发电机的动态行为有很大影响。特别是现代电力电子技术的发展，使快速响应、高放大倍数的励磁系统得以实现，极大改善了电力系统的动态性能<sup>[7]</sup>。

ETAP仿真程序为用户提供了多种励磁系统模型，根据Solar Turbines发电机励磁器仿真模型说明书，本仿真研究采用IEEE AC8B AVR/励磁器模型。传递函数如图1所示。

### 2.3 发电机调速器模型

ETAP仿真程序为用户提供了多种调速器模型，根据Solar Turbines发电机调速器模型说明书，本报告采用燃气轮机调速器（GT2）模型。传递函数如图2所示。

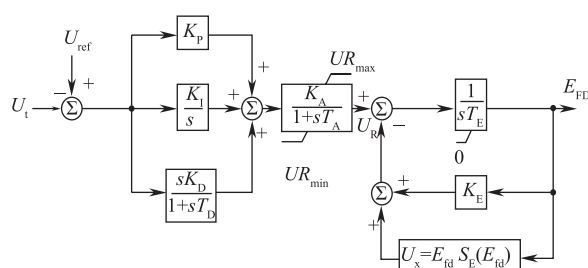


图1 IEEE AC8B AVR/励磁器模型传递函数

Fig. 1 IEEE AC8B AVR/transfer function for exciter model

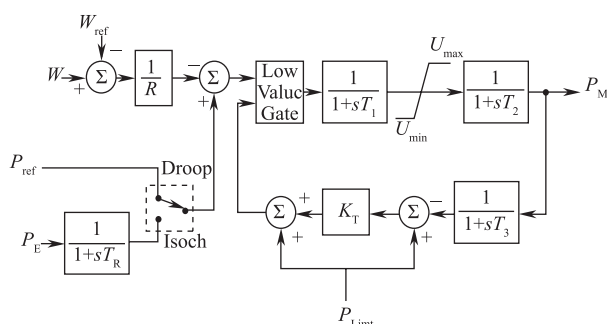


图2 燃气轮机调速器 (GT2) 模型传递函数

Fig. 2 Transfer function for gas turbine governor (GT2) model

## 2.4 负荷模型

负荷是电力系统的重要组成部分,负荷的特性就是负荷功率和节点电压、频率之间的关系。负荷模型主要分为静态负荷模型和动态数学模型。静态数学模型主要指恒定负荷,动态数学模型主要指考虑电力系统中感应电动机的机电暂态过程得到的复合模型<sup>[8]</sup>。

本文6.3 kV及以上电压等级母线上Motor负荷采用感应电动机模型,Feeder负荷中80%负荷采用感应电动机模型,20%负荷采用静态负荷模型。0.4 kV母线上的负荷多为照明负荷与电伴热负荷,采用静态负荷模型代替,其中20%恒阻抗模型,80%恒功率模型。负荷动态模型为感应电动机,模型采用有深槽效应的单笼电动机 (Single2) 模型,Single2是感应电动机的标准模型,用励磁支路,定子和转子回路代表电动机,并考虑到深槽效应,转子电阻和电抗随着电动机速率做线性变化,参数采用ETAP软件参数库中的典型参数。

## 2.5 变压器模型

各个平台主要变压器参数如表1所示。

表1 各个平台变压器参数

Tab. 1 Transformer parameter table of each platform

| 设备编号       | 额定容量 /<br>(kV·A) | 变压器电压比         | 短路阻抗 /% | X/R   |
|------------|------------------|----------------|---------|-------|
| I 区域       |                  |                |         |       |
| CEP-T-001  | 4 000            | 6.3 kV/10.5 kV | 6       | 11.41 |
| CEP-T-002  | 4 000            | 6.3 kV/10.5 kV | 6       | 11.41 |
| WHPA-T-001 | 2 500            | 6.3 kV/0.4 kV  | 6       | 10.67 |
| WHPA-T-002 | 2 500            | 6.3 kV/0.4 kV  | 6       | 10.67 |
| II 区域      |                  |                |         |       |
| CEP-T-001  | 6 300            | 6.3 kV/35 kV   | 8       | 13.55 |
| CEP-T-002  | 6 300            | 6.3 kV/35 kV   | 8       | 13.55 |
| WHPA-T-001 | 1 600            | 6.3 kV/0.4 kV  | 6       | 7.1   |
| WHPA-T-002 | 1 600            | 6.3 kV/0.4 kV  | 6       | 7.1   |
| CEPA-T-001 | 8 000            | 35 kV/6.3 kV   | 8       | 14.23 |
| CEPA-T-002 | 2 500            | 35 kV/0.4 kV   | 6       | 10.67 |
| CEPA-T-003 | 2 500            | 35 kV/0.4 kV   | 6       | 10.67 |

## 3 暂态稳定分析前提设定

### 3.1 电力系统组网典型运行方式

本文以电力系统组网典型运行方式作为仿真模拟设计输入:8台主机运行,II区域 CEP平台 4<sup>#</sup>机组备用,不考虑WHPE钻机模块(由CEPF直接供电)工作,负荷约1 500 kW。II区域 CEP盈余电力补充I区域 CEPF及I区域 CEP电站电力缺口,II区域 CEP盈余电力可送出容量按I区域WHPA平台2×6 300 kV·A主变压器容量的95%左右考虑,单体平台负荷如表2所示。

表2 典型运行方式计算条件

Tab. 2 Calculation conditions for typical operating mode

| 平台名称                 | 有功负荷 /kW | 无功负荷 /kvar | 发电机台数 /台 |
|----------------------|----------|------------|----------|
| I 区域 WHPB            | 4 327    | 2 120      |          |
| I 区域 CEP             | 7 153    | 3 464      | 11 947×3 |
| I 区域 WHPA            | 7 415    | 5 291      |          |
| II 区域 CEP            | 4 318    | 2 260      | 11 947×2 |
| II 区域 WHPA           | 6 716    | 4 792      |          |
| I 区域 CEPF (WHPE 未钻井) | 15 873   | 8 610      | 11 947×3 |
| I 区域 WHPC            | 12 273   | 6 757      |          |
| I 区域 WHPD            | 9 537    | 5 302      |          |
| I 区域 WHPE            | 4 200    | 2 233      |          |
| 合计                   | 71 812   | 40 829     |          |

### 3.2 系统故障方式选取

故障类型选取高压母线、海缆三相短路，短路后0.15 s将短路支路切除；切除一台发电机的暂态仿真，故障地点的选择是本着对系统可能造成后果严重的原则选取<sup>[9]</sup>。

### 3.3 保护动作与故障切除时间

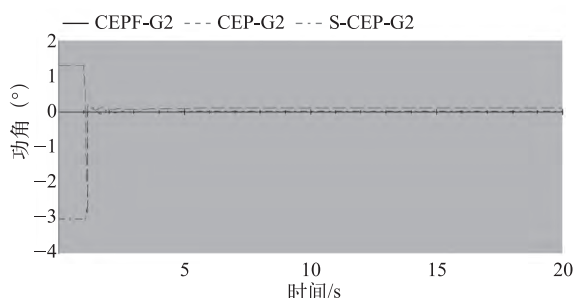
1) 母线三相短路故障。由于母线上不装设专门的母线保护，所以根据继电保护的配合和选择性的要求，故障由连接母线的海缆、变压器的后备保护切除，发电机由主保护瞬时动作，切除故障<sup>[10]</sup>。母线三相短路故障切除时间考虑0.15 s。

2) 优先脱扣减负荷动作时间：故障后0.2 s。

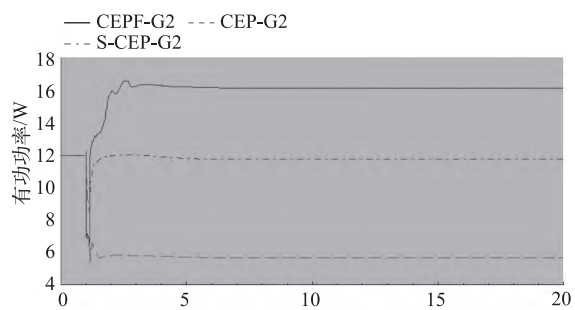
## 4 仿真计算

### 4.1 母线三相短路故障

I 区域 WHPA平台35 kV HV母线，本次仿真开始后1 s JZ25 -1S WHPA平台HV母线三相短路故障，故障后0.15 s保护动作，仿真曲线如图3所示。

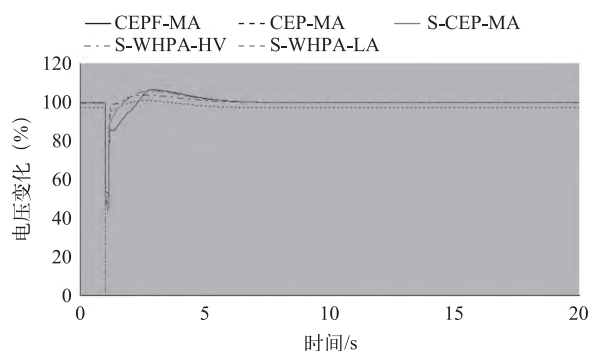


(a) 机组功角变化曲线

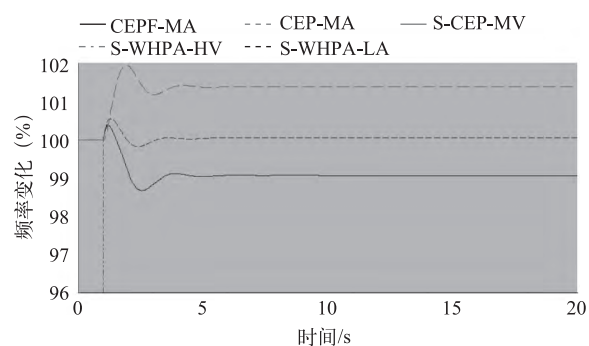


(b) 机组有功变化曲线

图3 I 区域 WHPA 平台 HV 母线三相短路故障仿真曲线  
Fig. 3 HV bus three-phase short circuit fault simulation curve for WHPA platform of I area



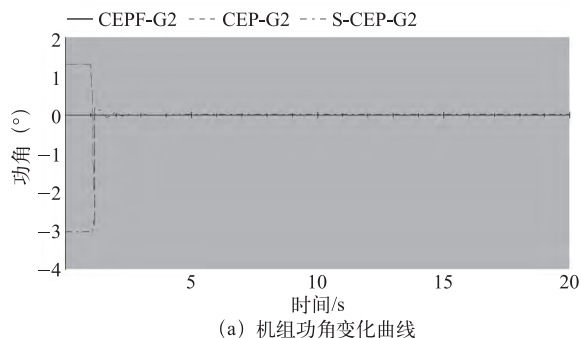
(c) 母线电压变化曲线



(d) 母线频率变化曲线

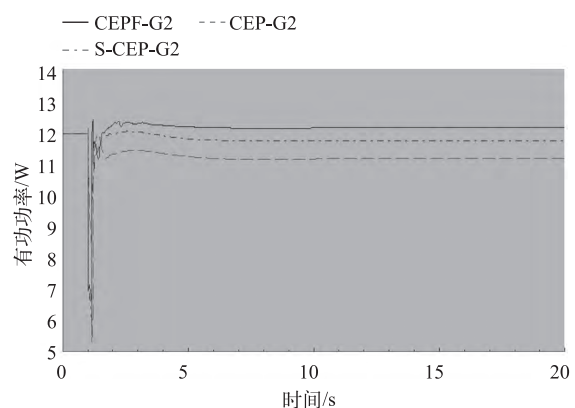
图3 I 区域 WHPA 平台 HV 母线三相短路故障仿真曲线  
Fig. 3 HV bus three-phase short circuit fault simulation curve for WHPA platform of I area

保护动作后，系统分解成三个子系统，由图3可知，子系统均稳定。II 区域 CEP 平台子系统在稳定后，系统频率为50.70 Hz，超出正常范围。建议故障后0.2 s切除II 区域 CEP 平台一台发电机，I 区域 WHPA 平台12.3 MW 负荷和II 区域 CEP 平台子系统频率恢复正常，仿真曲线如图4所示。

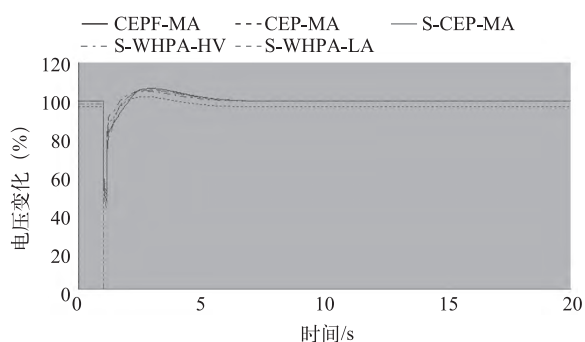


(a) 机组功角变化曲线

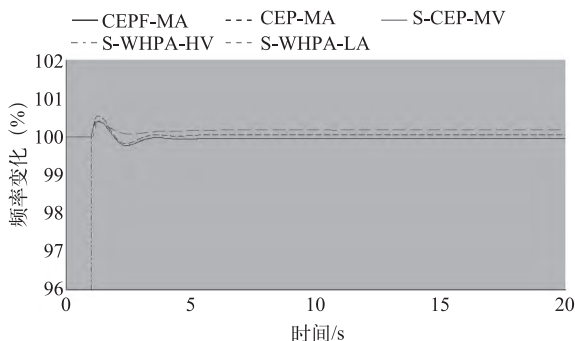
图4 I 区域 WHPA HV 母线三相短路故障采取建议措施后仿真曲线  
Fig. 4 HV bus three-phase short circuit fault simulation curve after taking recommended measures for WHPA platform of I area



(b) 机组有功变化曲线



(c) 母线电压变化曲线



(d) 母线频率变化曲线

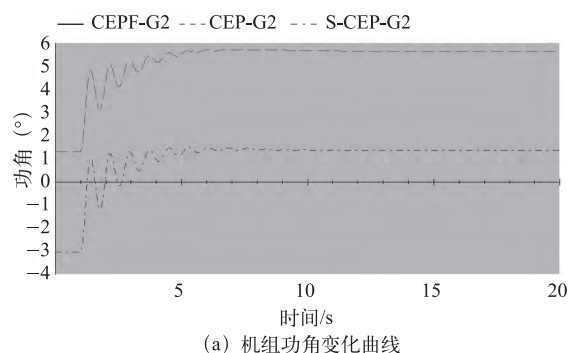
图 4 I 区域 WHPA HV 母线三相短路故障采取建议措施后仿真曲线

Fig. 4 HV bus three-phase short circuit fault simulation curve after taking recommended measures for WHPA platform of I area

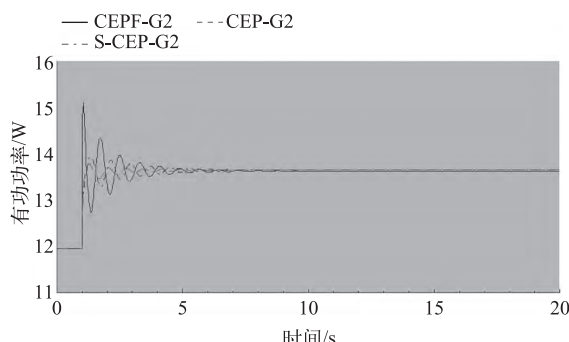
#### 4.2 单台发电机组故障

I 区域 CEPF 平台单台机组故障, 本次仿真开始后 1 s I 区域 CEPF 单台机组故障, 仿真变化曲线如图 5 所示。

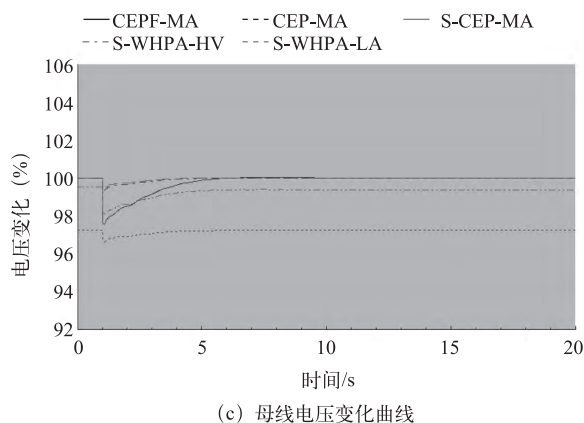
由图 5 可知, 系统可维持相应的暂态稳定性。



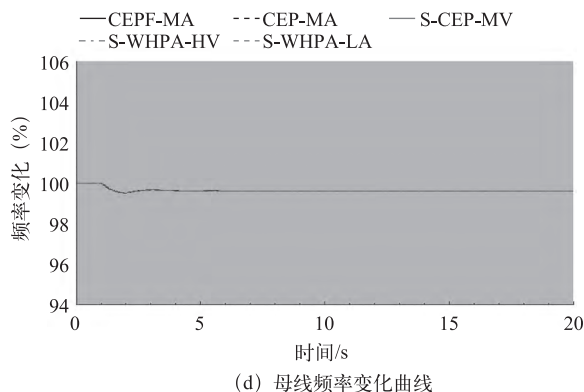
(a) 机组功角变化曲线



(b) 机组有功变化曲线



(c) 母线电压变化曲线



(d) 母线频率变化曲线

图 5 I 区域 CEPF 单台机组故障仿真曲线

Fig. 5 Simulation curve of single generator fault for CEPF platform in area I

## 5 仿真结果与结论

### 5.1 仿真结果

本文针对海上石油平台电力系统区域组网的典型运行方式,计算分析可能的故障类型,分析海上平台电力系统的电磁暂态和机电暂态过程,并对电力系统的安全稳定性进行分析和评估。暂态仿真结果如表3所示。

表3 暂态仿真结果汇总表

Tab. 3 Summary of transient simulation results

| 故障名称     | 故障地点                  | 切除时间<br>/s | 稳定<br>情况 | 极限切<br>除时间<br>/s |
|----------|-----------------------|------------|----------|------------------|
| 母线三相短路故障 | I 区域 WHPA 平台<br>HV 母线 | 0.15       | 稳定       | >2               |
| 单台机组故障   | I 区域 CEPF 平台          | 0.15       | 稳定       | —                |

### 5.2 结论

通过以上对渤海油田电力系统区域组网暂态稳定计算分析,得出以下结论:

1) 计算结果表明在组网电力系统不解列的条件下,项目组网电力系统各发电机组能够并列运行,在各种大扰动下可以保持系统稳定,且故障极限切除时间均大于2 s。

2) I 区域 WHPA 平台 HV 母线发生三相短路,保护动作后,系统解列成三个子系统,II 区域 CEP 平台开两台发电机的运行方式下,由于发电机出力与电力负荷严重不平衡,将导致其中的子电力系统频率不能恢复到正常范围内,切除该平台一台发电机后,子系统恢复正常。

3) 当负荷较重时,切除发电机组会导致其余发电机组输出功率越限,致使频率下降。因此当海洋平台电力系统区域组网重载运行发生发电机突然跳机后,应尽快切除负荷,保证频率稳定。

## 6 结束语

本文来源于生产实际,渤海油田电力系统区域组网典型运行方式下,对各种大扰动运用了 ETAP 软件进行暂态稳定仿真分析研究。通过研究表明,采用低频切负荷、高频切机等稳控措施

可以提高联网电力系统在严重故障情况下的稳定性,对于实际生产具有较强的指导意义,同时也为海上石油平台的供电故障问题分析提供了一种新的研究思路。

### 参考文献

- [1] 李晨,蒋德琰,程生安.电力系统暂态稳定分析方法的现状与发展[J].现代电子技术,2012,35(6):89-94.
- [2] 李强,李鑫,魏澈海上油气田群电力组网技术[J].中国造船,2011,52(1):218-222.
- [3] 张继芬,胡鹏,刘峻.海上石油平台电网安全稳定控制系统[J].石油勘探及技术,2009,36(2):237-241.
- [4] 张振国,王长进,李银朋.海洋石油工程概论[M].北京:中国石化出版社,2009.
- [5] HASANOVIC A, FELIACHI A. Transfer function identification and robust PSS control design[C]. Washington: proc of power engineering society general meeting, 2003: 1721-1725.
- [6] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统分析[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [7] NAKRA H, VAUGHAN R L, GAGNON C. Real-time simulator for power system dynamics studies[J]. IEEE Transactions on Power systems, 1995, 10(2): 1063-1070.
- [8] ERCEG R, ERCEG G, TESNJAK S. Starting of diesel electrical aggregate loaded with an induction motor[C]. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1998 (9): 673-678.
- [9] 夏道止.电力系统分析[M].2版.北京:中国电力出版社,2012.

### 作者简介

卢雪松(1982—),男,高级工程师,主要从事海洋石油工程电气设计工作。

(收稿日期:2021-10-25)