

舰船电力系统暂态稳定性仿真分析

方雄伟¹, 韩 旗²

(1. 中国船舶工业集团第七零八所, 上海 200011;

2. 海军驻上海地区舰艇设计研究军事代表室, 上海 200011)

摘要: 通过分析舰船电力系统暂态稳定性的特点, 并结合陆地电力系统暂态稳定性分析的理论, 提出了适用于舰船电力系统暂态稳定性分析的发电机六阶数学模型、电动机二阶动态模型和恒功率静态模型相结合的综合负荷模型, 以及具体的分析步骤。在舰船电力系统暂态稳定性分析中采用了适用于舰船电力系统暂态稳定的判据, 并同时考虑了原动机、调速器和励磁器的动态变化。针对实例, 在正常运行方式下, 考虑严重故障、运行方式切换以及大型电动机启动对舰船电力系统暂态稳定性的影响进行了分析研究。仿真分析验证了所建立的数学模型以及采用的分析方法的正确性。

关键词: 舰船; 电力系统; 动态模型; 暂态稳定性; 电动机启动

中图分类号: TM 712; U 665.13

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0035-05

0 引言

随着现代舰船电气设备的不断发展, 舰船电力系统网络结构变得更加复杂, 电力设备对电能品质的要求也越来越高, 对电站供电的连续性和可靠性的要求越来越严格^[1], 这使得电力系统的暂态稳定问题越来越突出。因此, 保证暂态稳定分析结果的准确性是电力系统稳定、可靠运行的必然要求, 迫切需要开展舰船电力系统暂态稳定性的分析和研究^[2]。

目前, 舰船电力系统暂态稳定性分析主要有以下几类: 时域仿真法、基于 Lyapunov 稳定性理论的直接法。时域仿真方法是将系统中各元件根据原件拓扑关系形成全系统模型, 是一组联立的微分方程组或代数方程组。它以稳定潮流为初值, 来求解扰动下的数值解。直接法是从系统能量角度看问题。它可快速做系统稳定判断, 但不计算系统运动轨迹, 模型较简单, 分析结果也容易偏于保守^[3]。

目前, 针对陆用大电网系统暂态稳定性的研究已经很成熟, 然而国内对舰船电力系统进行的暂态稳定性研究起步较晚, 积累很少, 缺乏舰船电力系统暂态稳定性分析的成熟理论, 也没有与之相适应的一套最佳方法, 主要是借用陆用大电网的分析方法。尽管二者之间有很多的相似之处, 但是在陆用大电网的研究中, 可以把电网的功率看成无穷大, 从而可以忽略发电环节的变化, 使整个分析得到了简化。然而, 在舰船电力系统的分析中, 必须考虑原动机、励磁调节器和负载等系统组成部分在整个动态过程中的变化, 忽略这些环节得出来的结果通常都会有较大的误差^[4]。

基于上述情况, 作者采用时域仿真的方法, 并借鉴陆地电力系统稳定性研究的经验和内容, 在分析舰船电力系统的区别和特殊需求后, 探讨了舰船电力系统暂态稳定性的研究内容及研究思路和步骤。在建立舰船发电机的数学模型时, 采用了发电机实用六阶模型, 此模型能更精确地反映发电机的暂态过程和次暂态过程。负荷模型采用了动态模型与静态模型相结合的建模方法, 其中动态模型使用忽略定子暂态的二阶微分方程组, 此模型可以模拟电网中电动机负荷对电压变化的响应^[5]。静态模型部分使用恒功率模型。同时由于考虑了励磁系统、原动机以及调速器的动态变化, 所以能准确地分析舰船系统的动态稳定问题。同时还采用了适用于舰船电力系统暂态稳定的判据。基于以上的分析, 结合舰船模型进行仿真分析, 并证明了该方法的正确性, 对于舰船系统的暂态稳定性分析也具有实际的指导意义。

1 舰船电力系统数学模型的建立

舰船电力系统一般由舰船电站、舰船电网和用电设备等组成^[6]。但是由于负荷特点和具体的工作条件的不同, 舰船电力系统与陆上电力系统相比, 有以下的不同。

a. 舰船电力系统容量较小。

b. 舰船电气设备比较集中, 电网比较小, 输配电网络比较简单。

c. 舰船电气设备的工作条件比陆地更恶劣, 环境条件对电气设备的运行性能和工作寿命有严重的影响。

d. 舰船电力系统的负载对系统的稳定性有较大影响。很多负载的容量同发电机容量可比拟, 容

量大的负载切换时对系统有比较大的影响。

e. 舰船电力系统稳定性较差。各种故障如短路、断路等对系统稳定性将产生较大的影响。

f. 在战斗情况下,负载变化剧烈,短路、断路不可预计^[4]。

舰船电力系统数学模型主要包括:柴油原动机转矩平衡模型、调速器模型、同步发电机模型、复励装置电压调整模型、感应电动机负载子模型、静负载子模型等。电力系统的参数和模型对分析计算的准确度非常重要。正确计及模型的作用,不仅可以提高计算的精度,在某些临界情况下还可能改变定性的结论。基于上述舰船电力系统的特点,在建立数学模型时要考虑其与陆上系统的差别,选择适用于舰船系统的数学模型。

1.1 发电机的数学模型

在建立发电机的数学模型时采用了具有高精度暂态分析的发电机实用六阶模型,由于六阶模型反映的暂态过程和次暂态过程比其他模型更为精确,更接近实际工作时的参数^[7]。模型关系式如下:

$$\begin{cases} \tau'_{d0} \dot{E}'_q = E_{fd} - [E'_q + (x_d - x'_d) I_d] \\ \tau'_{q0} \dot{E}'_d = -E'_q + (x_q - x'_q) I_q \\ \tau''_{q0} \dot{E}''_d = -E''_d + (x'_q - x''_q) I_q + E'_d + \tau'_{q0} \dot{E}'_d \\ \tau''_{d0} \dot{E}''_q = -E''_q + E'_q - (x'_d - x''_d) I_d + \tau'_{d0} \dot{E}'_q \\ \dot{\delta} = 2\pi f_0 (\omega - 1) \\ \dot{\omega} = \frac{1}{\tau_g} [P_J - D(\omega - 1) - P_e] \\ u_d = E''_d + x''_q I_q - r I_d \\ u_q = E''_q + x''_d I_d - r I_q \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{fd} 为与励磁电压对应的空载电动势; E'_d 、 E'_q 分别为发电机直轴和交轴暂态电势; E''_d 、 E''_q 分别为发电机直轴超瞬变和交轴超瞬变电动势; x_d 、 x_q 分别为发电机直轴和交轴同步电抗; x'_d 、 x'_q 分别为发电机直轴和交轴瞬变电抗; x''_d 、 x''_q 分别为发电机直轴和交轴超瞬变电抗; τ'_{d0} 、 τ'_{q0} 分别为发电机直轴和交轴瞬变短路时间常数; τ''_{d0} 、 τ''_{q0} 分别为发电机直轴和交轴超瞬变短路时间常数; τ_g 为惯性时间常数; u_d 、 u_q 分别为发电机直轴和交轴电压; I_d 、 I_q 分别为发电机直轴和交轴电流; r 为发电机定子绕组电阻; P_J 、 P_e 分别为机械和电磁功率; f_0 为工频频率(50 Hz); D 为阻尼系数; ω 为电角速度; δ 为功角。

1.2 励磁调节器的数学模型

舰船电力系统较之陆上电力系统具有容量小、运行区域大、负荷与发电机容量相当等特点,过渡过程呈现出变化快、幅度大等特点,通常经历电磁过渡、机电过渡 2 个基本阶段,励磁系统特别是快速励磁装置作为主要的调节控制装置,对于准确分析舰船系统的动态稳定问题具有重要意义。

发电机励磁电压对应的空载电动势 E_{fd} 满足:

$$E_{fd} = K_R U_E F_{EX} \cos \alpha = K_R U_E F_{EX} \arccos U_R \quad (2)$$

$$U_E = |K_p U_m + j K_I I_m| \quad (3)$$

其中, U_m 、 I_m 分别为电动机机端电压和定子电流; K_p 、 K_I 分别为电压回路、电流回路增益系数; K_R 为整流系数; F_{EX} 为整流器外特性工作区段变化系数; U_E 为整流桥输出电压; U_R 为控制电压。

励磁机的旋转电枢发出三相交流电,通过与之同轴旋转的二极管整流器整流成直流电后直接引入到发电机转子绕组中。发电机发出的交流电,通过变压器控制器后成直流电对励磁机进行励磁。

1.3 调速器数学模型

调速器数学模型可以由一个二阶方程来描述,其传递函数如下:

$$\frac{n}{\Delta n} = \frac{1}{s(\tau_z^2 s + 2\xi \tau_z)} \quad (4)$$

其中, n 为柴油机实际转速; Δn 为实际转速与目标转速之差; τ_z 为综合时间常数。

1.4 负荷模型

负荷通常包括感应电动机负荷和静态负荷。异步电动机模型为忽略定子暂态的二阶微分方程组,这样的二阶模型可以模拟电网中电动机负荷对电压变化的响应^[8],较为精确。静态负荷为除重要电动机负荷外的其他多种负荷的集合,恒功率类型负荷将会在暂态过程中对系统电压的支撑和频率的稳定带来最严重的影响。因此,为评估系统在恶劣条件下的暂态稳定性,本文将静态负荷建立为恒功率类型。相较于使用单一的静态负荷建模,误差会减小。

$$\begin{cases} \frac{de'}{dt} = -2\pi f_0 \cdot js_m e' - \frac{1}{\tau'} [e' - j(X - X') I] \\ \tau_J \frac{ds}{dt} = T_m - T \\ U_m = e' + (r_s + jX) I_m \\ T_m = K[a + (1-a)(1-s_m)^\rho] \end{cases} \quad (5)$$

其中, e' 为异步电动机内电势; s_m 为异步电动机滑差; τ_J 为异步电动机的惯性时间常数; τ' 为异步电动机转子回路时间常数; U_m 、 I_m 分别为电动机机端电压和定子电流; $X = X_s + X_m$, X_s 为异步电动机的漏抗, X_m 为励磁电抗; X' 为 $(X_s + X_m)$ 与 X_r 并联之值, X_r 为转子电抗; $T = \frac{X_r + X_m}{\omega_0 r_r}$ 为电磁转矩, ω_0 为同步电角速度, r_r 为转子绕组电阻; r_s 为定子绕组电阻; T_m 为负荷机械转矩; a 为负载转矩恒转矩部分所占比例; ρ 为与转速有关的负载转矩参数; K 为异步电动机的负荷率。

2 舰船电力系统暂态稳定分析

暂态稳定分析计算的目的在于确定系统在给定的大扰动下发电机能否继续保持同步运行。因此本文着重研究系统在经历大扰动,如各种短路/断路故障、运行方式切换以及大型电动机启动等之后的

动态过程,评估系统保持同步运行的能力、电压维持在可接受水平的能力以及维持系统频率恒定且不显著偏离正常值的能力。

系统由 6 台柴油发电机组组成,单台发电机组功率 1050 kW,其中 3 台柴油发电机组、主配电板、电站监控装置组成前电站,另外 3 台柴油发电机组、主配电板、电站监控装置组成后电站。全船负载由前后主配电板通过电源转换开关箱两路供电,即前后主板承担的负载功率基本相同。

2.1 计算条件

2.1.1 预想故障集

预想故障集包括:

a. 4 台机组分区运行下,前后电站主配板三相短路;

b. 前电站 G_1 、 G_2 发电机组并联运行,负载功率 1400 kW;后电站 G_4 、 G_5 发电机组并联运行,负载功率 1000 kW,某时后电站发生故障,由 G_4 、 G_5 承担的负载转由前电站 G_1 、 G_2 供电;

c. 4 台机组分列运行下前后电站电动机分批启动。

2.1.2 考核标准

a. 任意 2 台机组间相对角摇摆曲线在经过一个最大值后作同步衰减振荡。

b. 故障消失后,联络线功率振荡呈衰减趋势。

c. 系统频率维持在合理范围内,频率低于 49.0 Hz 的时间不大于 0.2 s,高于 51 Hz 的时间不大于 0.25 s。

2.2 舰船暂态稳定分析

2.2.1 三相短路时暂态稳定分析

稳态条件下,前后电站分区供电,前后主配电板跨接开关断开,前电站 G_1 、 G_2 发电机组并联运行,承担负荷 1440 kW,后电站 G_4 、 G_5 发电机组并联运行,承担负荷 1454 kW。

前电站暂态稳定分析与评估、仿真条件: $t=40$ s 时,前主配板发生三相短路故障,0.1 s 后,故障消失。整个暂态过程的动态曲线如图 1、2 所示。

图 1 中 f_{G1} 、 f_{G2} 为发电机 G_1 、 G_2 频率曲线, $P_{G1,J}$ 、 $P_{G2,J}$ 分别为 G_1 、 G_2 机械功率曲线。

图 2 中 u_m 为电压曲线, i_m 为电流曲线(均为标么值),由仿真曲线可知,短路故障发生时,主配电板

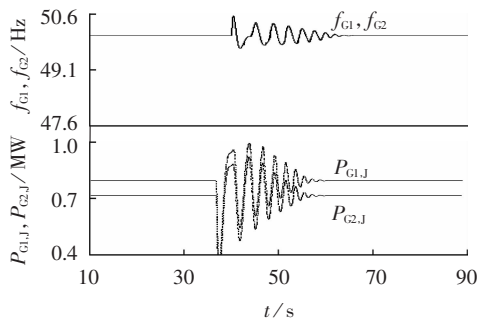


图 1 系统频率和发电机机械功率曲线

Fig.1 System frequency and generator mechanical power

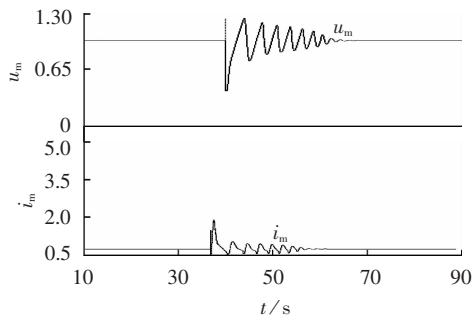


图 2 电动机机端电压和定子电流曲线

Fig.2 Terminal voltage and stator current of motor

压瞬间降为零,发电机输出电磁功率也瞬时接近于零,原动机的机械转矩不变,发电机转子加速旋转,系统频率上升调速系统快速响应,启动气门控制电机,调节原动机出力,减小机械功率。由于电气距离近,发电机机端电压变化剧烈,励磁系统为维持机端电压为给定值而强力调节。发电机输出的有功功率和无功功率随调速器和自动电压控制的调节而振荡收敛,达到稳态。

三相短路故障对电动机负荷的冲击也是明显的。但系统仍具有一定的调节能力,能够抵御此类三相短路严重故障的冲击,系统内各负荷的连续可靠供电可以得到保证。

后电站的暂态过程与前电站的基本趋势相同。

2.2.2 运行方式切换时暂态稳定性分析

稳态条件下,前后电站分区供电。前电站 G_1 、 G_2 发电机组并联运行,负载功率 1400 kW;后电站 G_4 、 G_5 发电机组并联运行,负载功率 1000 kW。某时后电站发生故障,由 G_4 、 G_5 承担的负载转由前电站 G_1 、 G_2 供电。研究在自动甩负载,自动启动 G_3 投网运行过程中电网的重要节点、主要旋转设备的动态响应。

仿真动作条件:在稳态运行下, $t=40$ s 时,后电站发生故障,发电机 G_4 和 G_5 同时跳闸;后电站电动机未脱扣, $t=40.1$ s 时,监测后电站总负荷超过在网发电功率 95% 以上,后电站一级、二级卸载策略无延时启动,共卸一级负荷 250 kW,二级负荷约 200 kW;此时发电机组负荷约为 1950 kW,在网三机组可发总功率约为 3150 kW,实际负载约为在网发电机总功率 61.9%,可以不启动卸载策略,系统无操作。整个动态过程是由包括发电机、电动机负荷在内的旋转设备,以及母联合闸和甩负荷策略在内的开关动作决定。监视网络各重要母线和旋转设备的动态曲线如图 3(纵轴单位为标么值)和图 4 所示。

由仿真曲线可知,当后电站因故失去电源后,后站电动机并未脱扣,发电机主开关包括优先脱扣指令响应,后电站同时卸载一、二级负荷,共计 450 kW,后站各台电动机端电压瞬时跌落。剧烈的功率波动和电压变化给电网形成了一定的冲击。前电站主要母线电压除在合闸瞬间跌至 0.95 p.u. 外,均保持在 0.98 p.u. 以上。

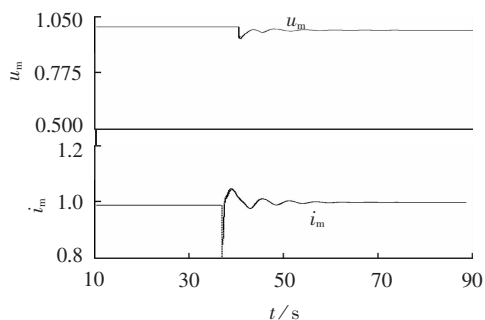


图 3 前电站各台电动机的端电压和电流曲线

Fig.3 Motor voltage and current of front power station

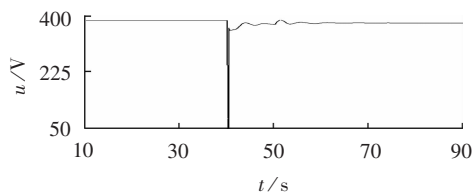


图 4 前后主配板动态电压曲线

Fig.4 Dynamic voltage of main distribution board

2.2.3 大型电动机负荷启动时暂态稳定性分析

稳态运行下,前后电站跨接开关断开,即前后电站独立供电,网内除电动机负荷外,其他负荷正常运行, G_1 、 G_2 并联运行行为前站供电, G_4 、 G_5 并联运行行为后站供电,待启动电动机负荷共计 1 190 kW,前后电站各 595 kW。

系统处于稳定运行中,10 s 时,第 1 组由 3 台 55 kW 电动机组成,直接启动;13 s 时,第 2 组由 2 台 55 kW 电动机组成,直接启动;23 s 时,1 台 160 kW 电动机按照星三角方式接入电网;26 s 时,另外 1 台 160 kW 电动机按照星三角方式接入电网。图 5 为主配板电压 u_{sc} 曲线(单位为标么值),图 6 为系统频率 f_s 曲线。

由仿真曲线可知,整个启动过程中主配板电压瞬时降至 0.9 p.u.。第二批电动机启动后,电压

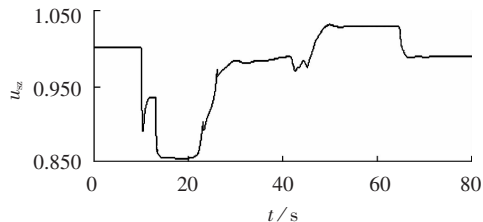


图 5 主配板电压曲线

Fig.5 Voltage of main distribution board

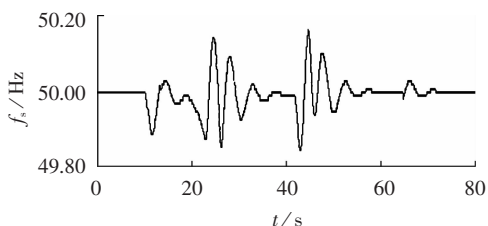


图 6 系统频率曲线

Fig.6 System frequency

降至 0.85 p.u.附近,此后的电动机需待系统电压有所恢复后再行启动,随着电动机负荷的逐步切入,调速系统增加发电机的功率输出,系统的频率在 49.9~50.2 Hz 小幅波动。大量电动机的启动对系统的冲击不大,不会影响重要负荷的供电安全性。

后电站的暂态过程与前电站的基本趋势相同。

3 结论

在分析了舰船系统与陆路系统的不同点之后,针对舰船系统的特点,采用分析陆用电力系统的理论,结合舰船各个机构的工作原理和特性,提出了适用于舰船电力系统暂态稳定分析的发电机六阶数学模型,电动机二阶动态模型与恒功率静态模型组合的综合负荷模型;并根据电力系统的特点设定预想故障集,通过稳定判据判断系统的稳定状态。然后通过对实际模型的仿真分析,得到的一系列结论证明所提出的建模方法以及分析方法是正确、可行的,并且为舰船暂态稳定性分析提供了范例,对舰船的暂态稳定性分析具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 罗耀华,叶瑰响,刘勇. 舰船全电力推进系统模拟研究[J]. 船舶工程,2002(4):59-61.
LUO Yaohua, YE Guiyun, LIU Yong. Simulation research on exclusive marine electric propulsion system[J]. Ship Engineering, 2001(4): 59-61.
- [2] 维列捷尼柯夫,JI.И. 船舶电力系统暂态过程研究的理论与方法[M]. 章以刚,译. 北京:国防工业出版社,1985:82-163.
- [3] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. 北京:中国电力出版社,2001:45-135.
- [4] 刘金波. 舰船电力系统暂态稳定性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2002.
LIU Jinbo. Analysis of naval vessel electric power system transit stability[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2002.
- [5] 黄曼磊,唐嘉亨,郭镇明. 船舶电站物理模拟系统的研究[J]. 船舶工程,1998(2):40-43.
HUANG Manlei, TANG Jiaheng, GUO Zhenming. Study of ship power station physical analogue system[J]. Ship Engineering, 1998(2):40-43.
- [6] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:45-89.
- [7] 孙元章,赵叔,黎雄,等. 考虑发电机励磁控制的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力系统自动化,2001,25(18):1-6.
SUN Yuanzhang, ZHAO Mei, LI Xiong, et al. Direct method of transient stability analysis for power systems with excitation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18):1-6.
- [8] 彭志炜. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京:中国电力出版社,2005:73-113.
- [9] 李冬丽. 舰船综合全电力系统暂态稳定性分析及仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2003.
LI Dongli. Analysis and simulation of the whole power system transit stability[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003.
- [10] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京:中国电力出版社,2007:30-109.
- [11] 方思立,苏为民. 励磁系统动态性能指标有关标准的分析[J]. 电力设备,2004,5(7):37-40.
FANG Sili, SU Weimin. Analysis of relevant specifications for dynamic performance index of excitation system[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(7):37-40.

- [12] 励磁系统数学模型专家组. 计算电力系统稳定用的励磁系统数学模型[J]. 中国电机工程学报,1991,11(5):65-72.
CSEE Task Force Report. Excitation system models suitable for studying power-system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1991,11(5):65-72.
- [13] 李冬丽,赵跃平,朱永权. 负载变化对舰船综合全电力系统暂态稳定性的影响[J]. 中国造船,2004,45(B12):238-245.
LI Dongli,ZHAO Yueping,ZHU Yongquan. Impacts of load fluctuation to the whole power system transit stability [J]. Shipbuilding of China,2004,45(B12):238-245.
- [14] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1985:204-242.
- [15] 张桂臣. 船舶电力系统暂态稳定性分析[J]. 青岛远洋船员学院

学报,2002,23(2):17-19.

ZHANG Guichen. The analysis of the stability of temporal state for ship's electrical system[J]. Journal of Qingdao Ocean Shipping Mariners College,2002,23(2):17-19.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

方雄伟(1977-),男,浙江金华人,高级工程师,硕士,从事控制工程研究(E-mail:fangxw708@sohu.com);

韩 旗(1970-),男,浙江杭州人,工程师,硕士,从事自动控制理论及其应用研究。

Shipboard power system transient stability simulation

FANG Xiongwei¹,HAN Qi²

(1. The 708 Design and Research Institute,CSSC,Shanghai 200011,China;

2. Navy Warship Design Representative Office Stationed in Shanghai,Shanghai 200011,China)

Abstract: The characteristics of warship power system transient stability are analyzed and combined with the theory of land power system transient stability analysis,the models suitable for shipboard power system transient stability analysis are put forward,such as the six-order generator mathematical model,the comprehensive load model including two-order motor dynamic model and constant power static model. Corresponding analysis steps are provided. The criterion suitable for shipboard power system transient stability analysis is adopted and the dynamics of prime mover,governor and exciter are considered. The influences of serious fault,operation mode switchover and large motor starting in normal operation on shipboard power system transient stability are researched with cases. Simulation verifies the correctness of the proposed mathematical model and the analytic method.

Key words: warship; power system; dynamic model; transient stability; motor starting