

脉冲负载下有限容量系统运行特性的仿真研究

吕 闯 解 璞

(军械工程学院车辆与电气工程系 石家庄 050003)

摘 要:脉冲负载是一种功率波动明显、频率切换频繁负载,而有限容量系统的系统惯性很小,非常容易受到负荷波动的影响,含有脉冲负载的有限容量系统动态过程复杂。为了研究脉冲负载对有限容量系统运行特性的影响,根据脉冲负载的特性建立了基于 MATLAB/Simulink 仿真模型,定义了脉冲负载下有限容量系统电气特性的计算公式,分析了脉冲负载在不同工作模式时对有限容量系统运行特性的影响规律。结果表明该模型可以较真实的反应脉冲负载的特性,且不同的负载参数对有限容量系统运行特性的影响规律也不相同。

关键词:有限容量系统;脉冲负载;运行特性;仿真

中图分类号: TM133 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Simulation study on operating characteristics of pulse load on the limited capacity system

Lv Chuang Xie Pu

(Department of Vehicle and Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The limited capacity of the system inertia is pretty small, and it is highly susceptible to load fluctuations. Represented by digital radar is a kind of pulse load which power switches fast and in large range. It is pretty obvious with the frequency fluctuation and voltage fluctuation when the limited capacity of the system work with pulse load, and the dynamic process is complicated. In order to study the working characteristic effect on the limited capacity system of the pulse load. This paper built the simulation model about the limited capacity of the system with pulse load based on MATLAB/Simulink and defined the pulse under load calculation formula of electric characteristic of the limited capacity of the system and studied the effect law of pulse load on the limited capacity system. The results show that the model can be a real response characteristics of the pulse load and the effect law on the limited capacity system is different with the different load parameters.

Keywords: limited capacity system; pulse load; operating characteristics; simulation

1 引 言

以相控阵雷达、通信装备、激光武器为代表的负载为典型的脉冲负载,其脉冲周期通常为几十或数百毫秒,消耗功率并不稳定,呈典型的脉冲特性,具有平均功率低、峰值功率大的特点。与常规负载启停时单次冲击不同,脉冲负载不仅在启动和停机时对电源有冲击作用,而且在正常运行时也会由于功率突变对电源形成反复的加载与卸载作用,引起输电线路大幅频繁的变化,从而影响电源的输出特性。柴油发电机组常用作军用移动电源,是军用微电网的重要支撑电源。具有体积小、启动迅速、供电可靠、维护方便的特点。

在对含有脉冲负载的有限容量系统研究中,文献[1]研究了脉冲负载机理,设计了3种可用于仿真分析的脉冲负载结构;文献[2]建立了含脉冲负载的综合电力系统,通过仿真分析了系统稳态的影响因素;文献[3]以船舶电力系统中单台小容量发电机为研究背景,通过建模仿真对系统电压、电流进行了分析;文献[4]针对负载发生大信号变化的情况,仿真中加入了机组可承受的负载范围;文献[5]针对脉冲负载对交流电压和频率的影响做了着重分析。但是上述文献中负载的功率都是稳定的,当负载功率反复突变时,应用上述仿真模型误差很大;且均未针对脉冲负载的参数(占空比 D 、工作周期 T_s /峰值功率 P_L)变化对有限容量运行特性的影响规律做详尽分析和讨论。

收稿日期:2017-02

以含脉冲负载的有限容量系统为研究对象,根据系统运行特点构建了仿真模型,着重对脉冲负载参数变化对有限容量系统电能质量的影响规律进行了仿真研究。

2 实验系统结构及工作原理

有限容量系统主要以柴油发电机组为主要供电电源,以蓄电池、光伏、风能等新能源为辅助电源。因此,以MATLAB/Simulink为仿真环境,建立以柴油发电机组为供电电源,脉冲负载为主要负荷的仿真系统。

2.1 柴油发电机组结构

柴油发电机主要由柴油机及调速系统、励磁系统和同步发电机3个部分组成,系统的仿真模型如图1所示。在这个系统中,柴油机作为原动机,主要将柴油燃烧产生的化学能转化为同步发电机驱动转子旋转的机械能,随后同步发电机根据电磁感应原理将机械能转换成电能向负载供电。其中,调速器的主要作用就是控制系统频率的稳定性,它采用带有功率平抑功能的双输入转速调节,通过转速控制器、功率控制器、油位控制器、油门执行器的配合来控制系统稳定。主要是将采集到的转速输出以及功率变化量反馈到控制器上,控制器再将这些变量经PID控制生成控制量输入到油位控制器,最后柴油机根据油门指令提供相应的机械功率。励磁系统的主要功能是为同步发电机提供稳定的励磁电流,通过引入同步发电机定子电压和电流的实时向量值,为同步发电机提供输出励磁电压,控制系统电压的稳定性^[6-7]。

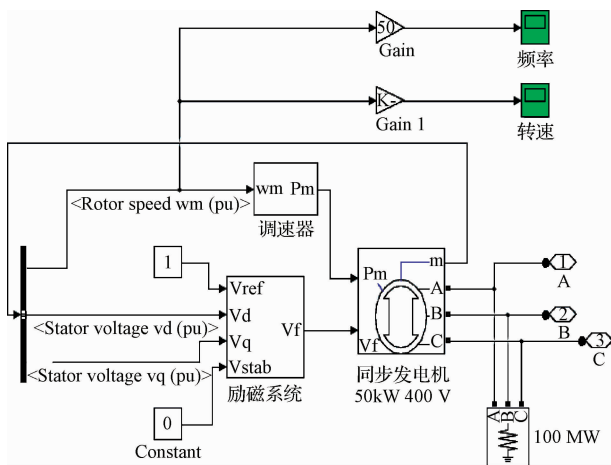


图1 柴油发电机仿真结构图

2.2 脉冲负载仿真结构

脉冲负载仿真结构主要由可控整流器单元、滤波单元、直流开关单元和负载单元组成。脉冲负载仿真模型如图2所示,其中直流开关由脉冲控制单元提供动作指令,可控整流单元的控制部分利用同步6脉冲发生器产生脉冲触发信号,以此来驱动三相桥式整流电路的各个晶闸管。为了得到直观的输出直流电压,该模型中添加了带输出电压反馈的控制电路,输入信号即为理想的直流电压,

然后通过和电路输出值比较,经过PID控制,得到移相控制角输入信号,进而直接输出直流母线电压。模型可通过设置滤波电容 C 、工作周期 T_s 、占空比 D 、峰值功率 P_L ,得到不同参数下脉冲负载表现出的不同工作特性。在分析其特性时,通过改变一个参数,固定其他参数,独立研究单一参数变化对脉冲负载工作特性的影响规律,进而深入研究脉冲负载下有限容量系统运行特性^[8-9]。

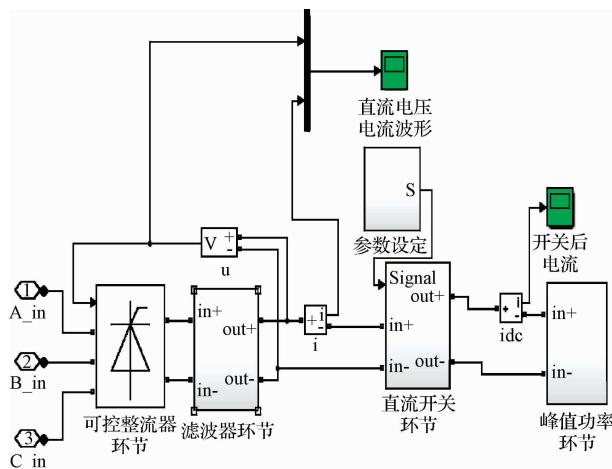


图2 脉冲负载仿真结构

3 仿真结果及分析

图3所示为柴油发电机组-脉冲负载系统,在该供电系统中,柴油发电机组作为等效直流电源向脉冲负载供电。可通过调节开关闭时间和时间占整个开关周期的比率来调节占空比,通过模拟脉冲负载的周期性通断来调节开关周期,通过调节脉冲负载阻值来调节峰值功率。柴油发电机组的同步发电机额定功率设为50 kW,功率因数设为0.8,柴油机输出频率为50 Hz,线电压 V_L 为400 V,可控整流器的输出电压设为500 V。同时,根据雷达的工作模式,设定滤波电感为0.125 mH,滤波电容为4 000 μ F,峰值功率为 P_L 为50 kW,占空比 D 为0.4,工作周期 T_s 为56 ms。仿真结果如图4所示。

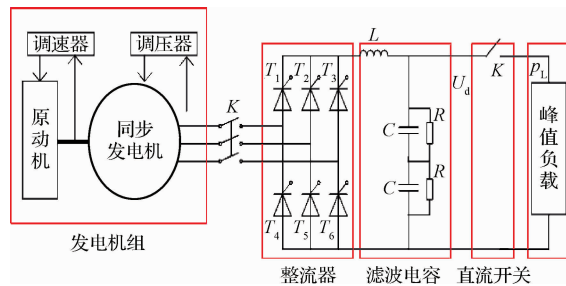


图3 柴油发电机组-脉冲负载系统

图4反映了仿真过程中柴油发电机输出频率的变化曲线,从图中可以看出由于负载的突然增大导致柴油机的机械功率小于负载的电磁功率,而油门调节器还没有动

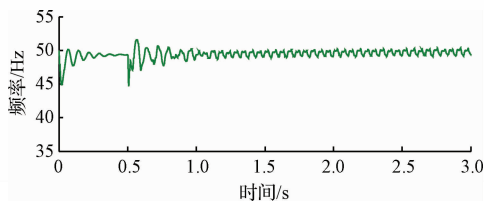


图4 柴油发电机组输出频率波形

作,所以导致转速下降以维持机械转矩不变,随后气缸进油量增加,柴油机输出功率逐渐提高,机械转矩增大从而转速恢复额定值。但由于脉冲负载的周期性波动,导致柴油发电机组的频率会以 T_s 为震荡周期在某一固定值附近小幅波动。

如图5所示,随着脉冲负载电流周期性突变,输出电压也发生了周期性波动,而且波动幅度较大。开关闭合后,脉冲负载消耗功率导致直流电压迅速下降,而当脉冲负载无电流时,在调压器作用下可以立刻恢复到额定值500V。

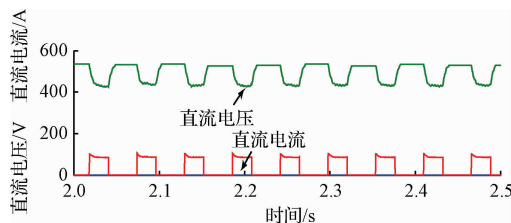


图5 直流侧负载电压与电流波形

图6所示反映了柴油发电机组交流电压畸变率的波形,从图6可以看出脉冲负载工作时电压畸变很严重,畸变幅值波动也很大,THD值在10%~40%之间波动,且电压畸变呈现一定的周期性。

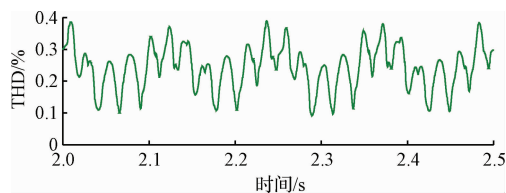


图6 柴油机电压畸变率

图7所示为柴油发电机组输出电流随脉冲负载功率波动变化的曲线,当柴油发电机组-脉冲负载系统无功率输出时,电枢电流极小;当脉冲负载消耗功率时,定子电流迅速增大,且畸变严重,当脉冲负载不吸收功率时,定子电流逐渐减小,定子三相电流的变化周期也是 T_s 。

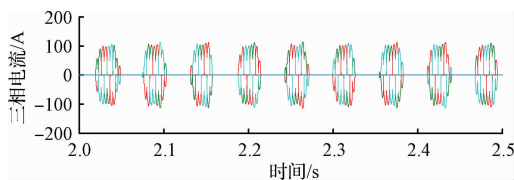


图7 柴油发电机输出三相电流波形

为了进一步分析研究脉冲负载参数对有限容量系统影响的规律,分别对仿真模型中脉冲负载的占空比、开关周期、峰值功率进行调整,并计算出柴油发电机组直流电压平均值 U_{dc} 、直流电压波动率 δ_u 、输出频率 f 、频率波动率 Δf 、负载消耗功率 P_{dc} 、功率传输效率 η 。仿真中设置滤波电容为4mF滤波电感为0.125mH。各稳态值具体如表1所示。(P代表峰值功率,D代表占空比、T代表工作周期)。

3.1 占空比对系统动态特性的影响

表1所示为改变占空比时系统的动态特性。由表1可以看出,仅改变占空比时,柴油发电机输出频率与直流电压平均值均在额定值附近小幅波动而脉冲负载消耗功率则随着占空比的增大而线性增加。且占空比的改变对功率传输效率的影响不大。占空比对电压波动率的影响如图8所示,当占空比较小(约小于0.5)时,电压波动随着占空比的增加而增大,这时系统负载增加,负载的功率随着占空比的增大而增大,柴油发电机的定子电流变化很大,从而导致电压波动增大;当占空比较大(约大于0.5)时,电压波动随占空比增大而减小,这时随着占空比增加,脉冲负载平均功率逐渐增大,负载平均功率接近于电源容量,由于负载电流增大而导致脉冲负载对机组冲击作用降低。当占空比为1时,脉冲负载呈常规负载特性,由负载引起的电压波动降低。

表1 改变占空比时系统动态特性(P50_T56)

D	f/Hz	$\Delta f/\%$	U_{dc}/V	$\delta_u/\%$	P_{dc}/kW	$\eta/\%$
0.1	49.64	1.31	501.8	10.32	4.50	90.1
0.2	49.55	2.64	498.6	13.84	8.69	87.7
0.3	49.53	2.91	491.5	16.93	11.85	79.6
0.4	49.76	3.58	493.7	18.54	16.72	83.5
0.5	49.78	5.21	499.2	20.38	21.03	84.5
0.6	49.80	4.55	497.5	17.46	26.11	87.6
0.7	49.83	3.57	486.7	15.38	30.83	88.4
0.8	49.91	1.79	487.1	12.51	36.04	91.2
1.0	49.80	0.21	495.6	1.37	45.93	92.1

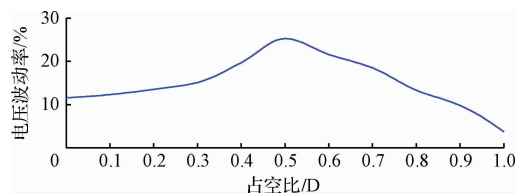


图8 占空比对电压波动率的曲线

3.2 工作周期对系统动态特性的影响

表2所示为改变工作周期时系统的动态特性,从表2可以看出,随着工作周期的增加,柴油发电机输出频率整体上变化不大,但是频率波动十分显著,图9所示为工作周期对频率波动率的影响曲线,由图9可以看出频率波动率随着负载工作周期的增加而增大,这是因为随着脉冲负

载工作时间增加,导致电压波动增加,从而导致频率波动增加。在占空比不变的情况下,增大脉冲负载工作周期相当于增大了脉冲负载工作时间,因而对机组励磁调压装置影响较大,而周期的增大会导致单位时间内周期个数的减少,所以从上表可以看出脉冲负载消耗的平均功率变化不大。而由于工作时间的增大导致峰值功率作用时间增长,从而需要电容提供更多的功率,因此脉冲间隙发电机组向电容充电的时间相应变长,相当于交流侧大功率负载作用时间变长,所以电压波动率随着工作周期的增加而增加。从上表可以看出功率传输效率随着工作周期的增加而提高。

表2 改变工作周期时系统动态特性(P50_D40)

T_s/ms	f/Hz	$\Delta f/\%$	U_{dc}/V	$\delta_u/\%$	P_{dc}/kW	$\eta/\%$
10	49.76	0.53	497.4	9.73	17.11	85.5
20	49.76	1.16	496.4	11.26	17.28	86.4
30	49.63	1.84	490.7	13.35	17.42	87.1
40	49.18	2.54	502.5	14.68	17.60	88.0
56	49.76	3.58	493.7	18.54	17.92	89.6
70	48.02	5.19	463.2	20.78	18.23	91.1
80	47.44	6.31	478.2	22.34	18.45	92.3
100	49.76	6.58	497.4	24.59	18.33	91.7

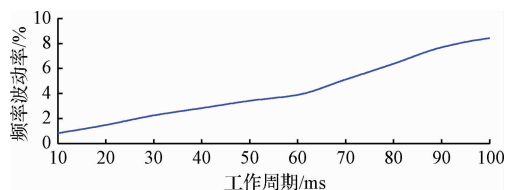


图9 工作周期对频率波动率的曲线

3.3 峰值功率对系统动态特性的影响

表3所示为改变峰值功率时系统的动态特性。由表3可以看出仅改变脉冲负载峰值功率相当于改变了脉冲负载平均功率,因此产生的变化同改变占空比时在某些方面有一致之处,负载消耗功率以及频率波动率都随着脉冲负载峰值功率增加呈线性增加。但峰值功率的变化对功率传输效率影响非常大,峰值功率对功率传输效率的影响曲线如图10所示,当改变峰值功率时柴油机输出频率和直流电压平均值基本保持稳定,而电压波动的变化十分显著,峰值功率越大,电压波动越大,这是因为当峰值功率增大时,负载的实际功率增大,导致系统中脉冲负载作用更强烈,因此柴油发电机组输出电压受负载电流变化影响更大,同时整流器调压效果也受到一定程度的影响,因此负载电压波动随脉冲负载峰值功率的增大而线性递增。而随着峰值功率的增加会导致单位时间内无功消耗的增加,从而导致功率传输效率大幅降低。当峰值功率为100 kW时功率传输效率甚至低于60%。

表3 改变峰值功率时系统动态特性(D40-T56)

P_t/kW	f/Hz	$\Delta f/\%$	U_{dc}/V	$\delta_u/\%$	P_{dc}/kW	$\eta/\%$
10	49.81	1.28	502.5	4.92	3.66	91.46
20	49.69	2.56	497.1	9.77	5.92	86.42
30	49.74	3.01	503.1	13.25	9.99	83.24
40	49.63	3.57	493.2	16.38	13.20	82.47
50	49.76	4.68	493.7	18.54	16.27	81.35
60	49.58	5.42	492.1	20.12	17.91	74.64
70	49.54	6.34	482.4	22.53	19.45	69.57
80	49.7	7.13	483.3	23.48	19.84	61.87

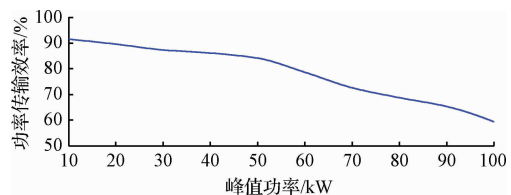


图10 峰值功率对功率传输效率变化曲线

4 结论

根据含脉冲负载的有限容量系统的特点,建立了符合脉冲负载特性的仿真模型,分析了脉冲负载作用下柴油发电机组电压波动、频率波动、功率传输效率等特性,并通过分别改变脉冲负载的占空比、工作周期、峰值功率来进行讨论研究脉冲负载对柴油发电机组的影响,以此来定性分析脉冲负载在不同工作模式下对有限容量系统运行特性的影响规律,主要得到如下结论:

- 1) 脉冲负载占空比对电压波动影响最大,在 $D \approx 0.5$ 时电压波动最为严重,占空比的变化对频率波动和功率传输效率影响不大。
- 2) 脉冲负载工作周期对频率波动影响最大,工作周期越长频率波动越厉害,工作周期的变化对电压波动有一定影响,对功率传输效率几乎无影响。
- 3) 脉冲负载峰值功率对功率传输效率影响最大,峰值功率越高,功率传输效率越低,负载电压波动率和频率波动率都随峰值功率的增加而线性增加。

参考文献

- [1] 刘正春,王勇,尹志勇,等.有限容量系统脉冲性负荷建模与仿真[J].华北电力大学学报.2014,41(1):34-37.
- [2] 陈宇航,王刚.含脉冲负载的综合电力系统运行特性分析[J].船电技术.2016,36(6):1-5.
- [3] 包艳,施伟峰.船舶电力推进系统运行的仿真[J].中国航海,2011,34(4):34-38.
- [4] COOPER A R, MORROW D J, CHAMBERS K D R. Development of a diesel generating set model for large voltage and frequency transients[C]. Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010:1-7.

(下转第77页)