

基于舰船电力系统的磁饱和型限流器的研究

梁旭东¹,石雄文²,叶志浩¹

(1. 海军工程大学电气工程系;湖北 武汉 430033; 2. 海军东海舰队舟山基地,浙江 舟山 316000)

摘要: 舰船电力系统容量的不断增大使得短路电流水平大幅度提高。现有开关的分断能力已经无法满足短路保护的要求,必须对短路电流峰值加以限制。研究了磁饱和型限流器的工作原理,根据经典电机暂态分析理论,得到了电感合适值的计算公式。建立了基于 simulink 下 SimPowerSystems 模块库的仿真模型,对系统加 FCL 前后的短路过程进行了仿真研究,仿真结果与理论计算吻合良好,证明理论结果是可信的。

关键词: 磁饱和; 限流器; 电力系统; 短路

中图分类号: TM562 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)12-0032-04

0 引言

海军舰船的日益大型化以及新装备、新武器的不断投入使用,使得舰船电力系统的容量不断增大,从而使得短路电流水平大幅度提高,超出了现有断路器的分断极限。因此,必须使用所谓限流器(FCL)对短路电流峰值加以限制,使得现有断路器能够正常分断,达到有效保护各种电气以及电子设备的安全、尽可能地缩小故障范围、保证电力系统的不间断供电的目的。

限流器的种类很多,有应用电力电子器件的固态限流器,有运用电抗器饱和原理的磁饱和型限流器等。本文将着重讨论应用于舰船电力系统的磁饱和型限流器的相关问题。

1 限流器工作原理

1.1 工作原理

该类 FCL 基于饱和电抗器的原理,每个 FCL 由两个完全对称的闭合磁路构成,对应交流电流的正负半周。两个闭合磁路各有一个完全一样的直流激磁回路,而其交流绕组互相串接,电流方向相反。直流激磁线圈一般采用超导材料,也可以用普通导线,两者原理完全相同。每相均设置一个 FCL。其特性可用如图 1 所示的 $\psi-i$ 曲线表示:

当电力系统处于正常运行时,FCL 的磁路处于深饱和状态,对外表现为极小的电感值(用 L_s 表示),对系统的正常输出电流影响不大;而当系统发生短路故障时,其短路电流的绝对值将超过给定值 i_a 时,此时 FCL 的两个磁路随电流方向的不同轮流进入线性区,整个 FCL 表现为一个很大的电感值(用 L_u 表示),从而把回路中的短路电流抑制在期

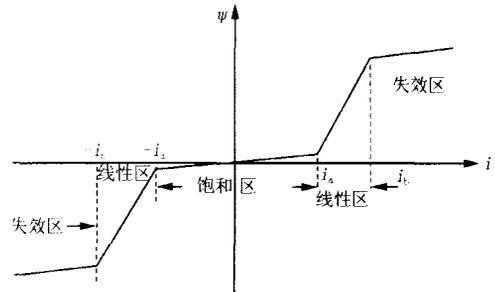


图 1 FCL 的 $\psi-i$ 曲线
Fig. 1 $\psi-i$ curve of FCL

望范围内。需要说明的是,当电流绝对值超过 i_b 时,限流器的电感值又变回 L_s ,此范围被称为失效区。在设计 FCL 时应避免由于电感 L_u 取值不当,导致限流失败而进入失效区。FCL 的特性可表示为如下关系式:

$$L = \begin{cases} L_u & \text{当 } I_a < |i| < I_b \text{ 时} & \text{(线性区)} \\ L_s & \text{当 } |i| < I_a \text{ 时} & \text{(饱和区)} \\ L_s & \text{当 } |i| > I_b \text{ 时} & \text{(失效区)} \end{cases}$$

1.2 布置方式

一个典型的舰船电力系统如图 2 所示。可见,FCL 有几种布置方式,其中以布置在各台发电机出口端(A 处)或在汇流母线各分段开关附近(B 处)两种较为典型。笔者认为前者更为合理。它能较好的保护各台发电机,如果采用发电机出口端布置时,无论在何处发生短路,每台发电机都会得到保护,这对于军用船只来说,至关重要,同时汇流母线上的分段开关上受到的短路冲击电流也相对较小。当以后者方式布置,即布置在 B 处时,假如在 D1 处短路,则发电机 G1 将得不到保护,同理,分别在 D2, D3, D4 等处发生短路时,发电机 G2, G3, G4 等就得不到保护,其主开关最大会受到几十倍额定电流的短路电

流的冲击。

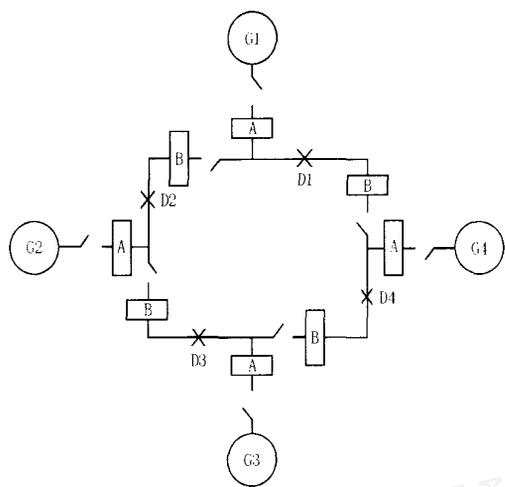


图2 FCL 布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of FCL allocation

2 FCL 电感合适值的具体估算

当 FCL 安置在各发电机出口端时,为了有效抑制网路中突然短路电流,电感值 L_u 的大小对设计 FCL 至关重要。如果电感取得不够大,将不能把短路电流抑制在 FCL 的有效工作区,从而失去设置 FCL 的意义;而电感取得过大,会降低经济性,增加限流器的体积和设计难度。

2.1 电感值选取原则

各种情况下的短路都将在发电机端口产生很大的电流,其短路电流的峰值因发生短路的位置不同以及短路的类型不同而有较大的差异。FCL 电感值 L_u 的选取,应以能抑制短路最恶劣的情况,亦即抑制最大的短路峰值电流到期望值以下为原则。

考虑到线路阻抗所引起的衰减作用,汇流母线以外地方的短路所引起的发电机端口的短路电流峰值小于在汇流母线处短路所引起的发电机端口的短路电流峰值。因而,电感值的选取应考虑汇流母线处的短路。舰船电力系统的汇流母线距离较短,阻抗较小,常可以忽略不计,母线处的短路便可看成每台发电机端口的短路。舰船电力系统采用三相浮地方式,发电机端口的短路有三相突然短路,两相不对称突然短路两种情况。

2.2 三相对称短路最大峰值电流

由文献[1]可知,发电机空载稳定运行,在转子位置角为零度时突然短路,短路的峰值电流为最大,其值为 $2 E_0 / x_d$ 。

2.3 两相不对称短路最大峰值电流

同样由文献[1]可知,对于两相不对称短路,在

-0 坐标系中,运用谐波平衡法,可计算出其最大峰值电流为 $\sqrt{3} E_0 / x_d$ 。

2.4 FCL 电感值的估算

当三相发电机端口安装了 FCL 后,由于每相相电流一般不能同时达到限流器开始限流的电流值 i_a ,限流器不是同步开始限流,因而发电机负载不对称,这使得具体的求解变得很困难。然而,短路电流将在极短的时间内上升到峰值,而 FCL 开始作用的电流下限值远远小于短路电流的峰值,因此,各相 FCL 开始作用的时间相差极小,实际运行时,可以看作所有 FCL 同时工作。

在求解时,把限流器的电感折算到发电机里面,即把发电机和限流器等效为一个新发电机。用 x_L 表示限流器的电感值(也就是在线性区的电感值),其电阻较小,可以忽略不计。用下标 m 代表新的电机,则有, $x_{dm} = x_d + x_L$, $x_{dm} = x_d + x_L$, $x_{dm} = x_d + x_L$ 。也就是说,把在端口串接限流器的同步发电机短路以及限流过程简化为一个“新”电机的三相对称突然短路问题。

分析“新”电机三相对称短路的方法与普通电机一样,计算可得到峰值电流最大为 $2 E_0 / x_{dm}$;同理,在两相不对称短路时的峰值电流最大为 $\sqrt{3} E_0 / x_{dm}$ 。显然,后者小于前者。我们只需考虑限制三相对称短路的峰值电流就可以了。假定短路相电流必须限在某个值以下,如 I_0 (为标么值),则有:

$$2 E_0 / x_{dm} = I_0 \quad (1)$$

代入 $x_{dm} = x_d + x_L$,则有

$$x_L = 2 E_0 / I_0 - x_d \quad (2)$$

在定子基值系统中,电感的标么值等于电抗的标么值,即 $x_L = L$,记 L_{1b} 为电感基值,可以得到电感的实际值 L_u :

$$L_u = (2 E_0 / I_0 - x_d) L_{1b} \quad (3)$$

也就是说,为了把三相短路的最大峰值电流限制在 I_0 以下,限流器工作区的电感值 L_u 必须大于 $(2 E_0 / I_0 - x_d) L_{1b}$ 。考虑到做了一定的近视,该不等式的等号不一定取得到。很显然,由于三相对称突然短路的峰值电流要比两相不对称突然短路的峰值电流大,因而,式(3)所选择电感值,对于两相不对称突然短路情况也是满足要求的。

3 仿真

运用 Simulink 仿真软件中的 SimPowerSystems 模块库,搭建了相应的模块图。以实验室一台小功

率的模拟实验电机为例,对该发电机空载,低负荷(10%额定负荷)和额定负荷三种情况进行了仿真。该发电机的部分参数如表1所示。

表1 某发电机部分参数

Tab.1 Partial parameters of a certain generator

参数名称	x_d'/pu	x_q'/pu	S_n/VA	V_n/V	E_0/V	T_d/s	T_q/s
参数值	0.060	0.103	500	0	230	278.83	0.023

其中: S_n 表示额定视在功率, V_n 为线电压, E_0 为发电机空载稳定电势。

3.1 空载短路时的仿真研究

仿真图中,采用 Simulink 模块库中的非线性电感元件表示限流器,用三相故障器(3-Phase fault)来仿真短路情况,用 Powergui 模块来设定短路发生时各种参数的初始状态,以实现空载稳定运行,且 a 相电压零初始角时突然短路。

发电机的额定电流为 12.5 A,根据相关标准,设发电机主开关的瞬时脱扣电流值为 30 A(为发电机额定电流的两倍左右),要求把短路电流限制在主开关瞬时脱扣电流的三倍左右,约为 75 A。由此,根据式(3),推算出限流器电感值 L_u 约为 21.65 mH。对限流过程进行仿真,其 a 相波形如图 3 所示。不加 FCL 时的短路波形如图 4 所示。

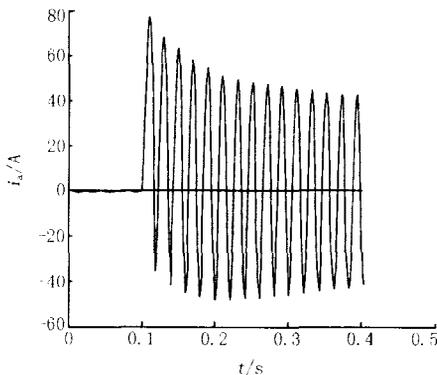


图3 加 FCL 时 a 相短路电流波形

Fig.3 Waveform of a-phase short circuit with FCL

仿真波形表明,加 FCL 后发电机的短路峰值电流被抑制到 75 A 左右。

3.2 带 10%额定负荷时短路的仿真研究

短路时的切入角为随机,其三相电流波形中,峰值最大相波形如图 5 所示,峰值电流被限制在 75 A 左右。同样,不加 FCL 的短路波形如图 6 所示。

3.3 发电机额定负载时短路的仿真研究

短路时切入角为随机,三相电流波形中峰值电流最大相的电流波形如图 7 所示,波形同样表明峰值电流被限制在 75 A 左右。图 8 是不加 FCL 的短

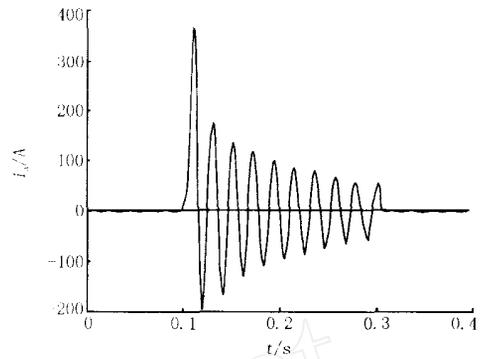


图4 不加 FCL 时 a 相短路电流波形

Fig.4 Waveform of a-phase short circuit without FCL

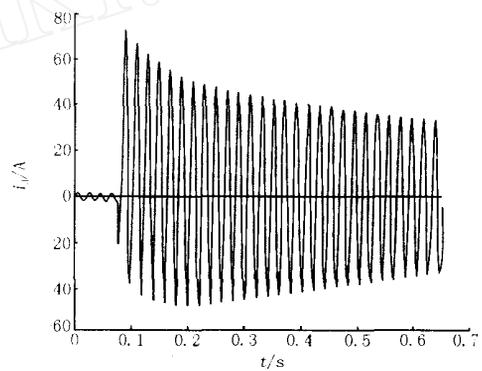


图5 加 FCL 时短路电流最大相波形(10%额定负载)

Fig.5 Waveform of maximal phase of short circuit current with FCL(10% rated load)

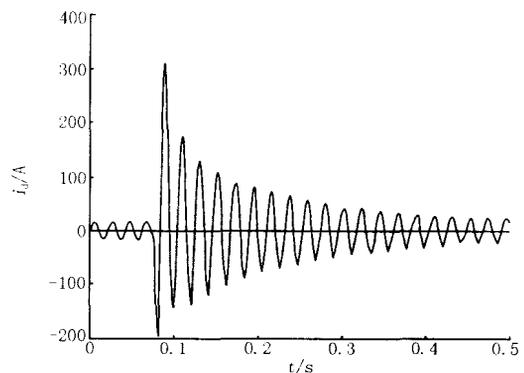


图6 不加 FCL 时短路电流最大相波形(10%额定负载)

Fig.6 Waveform of maximal phase of short circuit current without FCL(10% rated load)

路波形。

4 结论

本文综合分析了舰船电力系统的特点,以及短路的各种情况,运用经典的同步发电机暂态分析的思想对 FCL 的工作原理进行了分析。分析可见:

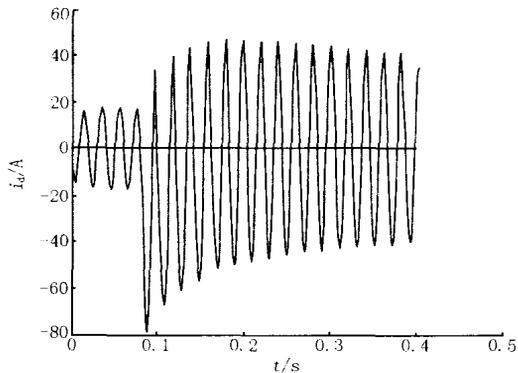


图7 加 FCL 时短路电流最大相波形(额定负载)
Fig.7 Waveform of maximal phase of short circuit current with FCL (rated load)

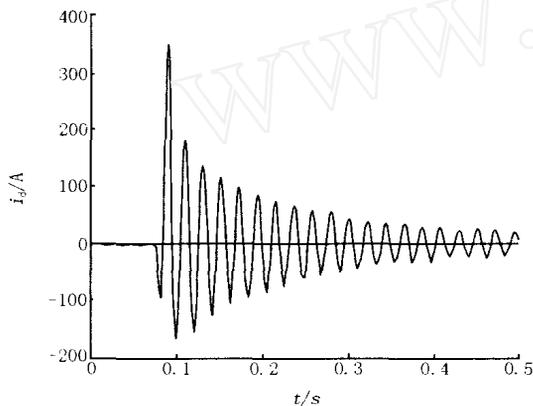


图8 不加 FCL 时短路电流最大相波形(额定负载)
Fig.8 Waveform of maximal phase of short circuit current without FCL (rated load)

1) 在舰船电力系统中, FCL 布置在各发电机端口较为合理;

2) 磁饱和型 FCL 的电感合适值可由式(3)得到;

3) 仿真结果与理论计算吻合良好, 证明本文的工作是有效的, 得到的结论是可信的。

参考文献:

- [1] ZHANG Gai-fan, MA Wei-ming. Transient Analysis of Synchronous Machines [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002.
- [2] 许实章 (XU Shi-zhang). 电机学 (Electromechanics) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1990.
- [3] 谌平平, 谭凌云, 吴兆麟 (CHEN Ping-ping, TAN Ling-yun, WU Zhao-lin). 桥式固态限流器的分析和设计 (Analysis and Design of Bridge Type Solid State Current Limiter) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2000, 34(1): 7-9.

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-11-11

作者简介:

梁旭东(1967-), 男, 硕士研究生, 研究方向为舰船电力系统保护与安全运行;

石雄文(1966-), 男, 工程师, 从事舰船技术保障工作;

叶志浩(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为舰船电力系统保护与安全运行。

Analysis of magnetic saturation FCL based on systems of naval ships

LIANG Xu-dong¹, SHI Xiong-wen², YE Zhi-hao¹

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Zhoushan Base of Naval East Sea Fleet, Zhoushan 316000, China)

Abstract: With the accretion of naval ships power system capacity, the amplitude of short circuit current increases greatly, consequently the disjuncting capacity of the present switch can not fulfill the demand of short circuit protection. Therefore, the amplitude of short circuit current must be limited. The working principle of magnetic saturation FCL is discussed, and based on the theory of typical machine transient analysis, the formula of calculating suitable inductance is obtained. The simulation model using SimPower-Systems module of simulink is established and the simulation analysis is carried out during short circuit when the system equipped with or without FCL. Simulation results accord with the theoretical calculation ones, which proves the theoretical analysis is believable.

Key words: magnetic saturation; FCL; power system; short circuit

(上接第 11 页 continued from page 11)

Abstract: A mathematical model of bidding strategy based on game theory for electricity suppliers in competitive power market is studied. The aim of the model is maximizing its expected income. It describes the bidding problem with zero-sum and two-person mixed strategy and proposes the market price according to normal distribution. But there are many factors that cannot be assured by decision-maker in power market. Simulation has proved to be an effective method to evaluate and correct the bidding scheme. Some different schemes are presented for the simulated bidding processes. Price and demand data of a power market and cost function of a steam-turbine generator unit are adopted for the simulation. The simulation results especially the average income and risk are analyzed. A revised optimal bidding scheme is presented.

Key words: power market; game theory; simulation; risk analysis