

高阻接地的船舶中压电网暂态短路电流计算

张彦魁¹, 毕大强¹, 宋巍涛², 董世军³

(1. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 青海省西宁供电公司, 青海 西宁 810000;
3. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对高阻接地方式的船舶中压电网, 提出一种系统化的暂态短路电流计算方法。考虑同步发电机及异步电动机暂态特性, 根据故障点位置, 基于分层等效方法将系统中所有发电机和电动机等效为一台发电机。对于等效发电机, 考虑系统分布电容, 用对称分量法求解三相对称及各种不对称故障的暂态电流。用 Simulink 仿真结果对比验证了该方法的有效性和精确性。

关键词: 船舶中压电网; 高阻接地; 等效发电机; 暂态短路电流

Transient short circuit current calculation for shipboard medium voltage power grid with high resistance grounding

ZHANG Yan-kui¹, BI Da-qiang¹, SONG Wei-tao², DONG Shi-jun³

(1. State Key Lab of Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Xining Power Supply Company, Xining 810000, China; 3. Xuji Electric Co., LTD, Xuchang 461000, China)

Abstract: A systematic calculation method for transient short circuit current is presented for the shipboard medium-voltage (MV) power grid with high resistance grounding. Considering the transient characteristics of synchronous generator and asynchronous motor, according to the location of short circuit, all generators and motors in the system are equivalent to a generator based on the layered equivalent method. For the equivalent generator, the transient currents under three-phase symmetrical and various asymmetric faults including system distributed capacitance are solved by using symmetrical component method. Simulink simulation results verify the validity and accuracy of the method.

Key words: shipboard MV power grid; high resistance grounding; equivalent generator (EG); transient short circuit current

中图分类号: TM713 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0017-07

0 引言

电力系统正常运行状态的破坏大多由短路故障引起, 而设备过流能力校验及保护装置协调配合都需要计算短路电流。现代船舶中压电网为发配用电紧密一体的独立电力系统, 且有大容量动态负荷, 不具备陆上电网单机无穷大特征, 短路计算必须考虑系统暂态特性。现有方法一般假定故障后电压源恒定, 主要致力于网络等值简化以获得短路点的短路阻抗^[1-6]; 或者虽然考虑了发电机暂态模型, 但仅对机端故障进行分析, 而且方程十分复杂^[7-8]; 或者考虑电源暂态模型的同时, 仅对简单汇流排或馈线短路进行计算^[9]; 或者仅用一个等效电源与一个等值阻抗加到短路点, 不计系统电容、旋转电机次暂态特性等因素^[10]。T.Kai提出一种故障电流简化计算

方法^[11], 考虑同步发电机暂态及各种不对称故障, 但仅针对机端短路或单机对无穷大母线, 且发电机为直接接地方式, 不适于船舶电网短路计算。

对包含环网的复杂结构船舶电网, 现有方法一般通过星网变换或高斯消去进行网络化简, 但系统规模较大时则较为困难^[12]。对辐射配网, 文献[13]利用链表层次搜索和戴维南定理将网络中电源点逐级等效, 得到网络对于某短路点的等效电压源和等效阻抗, 从而计算短路点故障电流。这种方法规避了矩阵分解迭代等复杂运算, 同时保证了结果的精度, 且对网络结构变化有较强适应性。文献[14]将上述电源等效法的应用范围扩展至有环网络。但是这种电源分层等效方法是针对传统配网的, 故障后电源保持恒定, 亦不适于船舶电网短路电流计算。

本文针对高阻接地的船舶中压电网, 提出一种

系统化的暂态短路电流计算方法。考虑同步发电机及异步电动机暂态特性,根据故障点位置,基于分层等效方法将系统所有电机等效为一台发电机。对等效发电机,考虑系统分布电容,用对称分量法求解对称及各种不对称故障的暂态短路电流。

1 等效发电机模型

以辐射状船舶电网为例。该类电网可看作以短路点为根节点的树状结构,除根节点外,每个节点的父节点有且只有一个,任意两节点间的路径存在且唯一。发生短路时,网络中电流将集中分布在各电源点至短路点的路径上,而其他支路电流近似为零。因此,根据辐射结构特点,利用链表描述网络节点之间的关联关系能直接进行网络拓扑的戴维南等效^[13]。对单机或多机并联系统,通过链表中父节点的唯一性快速搜索短路点至电源点的路径求得路径的总阻抗及等效发电机;对于多电源非并联系统,基于深度及宽度优先搜索的层次搜索法识别戴维南等效次序,按照该次序将电源两两等效。船舶电网短路电流计算需要考虑发电机和电动机暂态特性,将两台发电机等效为一台发电机,或把两台电动机等效为一台电动机,或把一台发电机和一台电动机等效成一台发电机,最终等效为一台发电机和一个阻抗连接短路点^[9]。以图1中的网络为例说明等效过程,首先是G₁与G₂等效为EG₁,EG₁与G₃再等效为EG₂,EG₂再与M₁最终等效为等效发电机EG₃。需要指出的是,对于经变频调速环节供电的推进电动机,其外部发生短路故障时,短路电流由于整流模块二极管的单相导通性无法回馈到短路点,推进电动机对总的短路电流没有贡献,因此不予考虑。

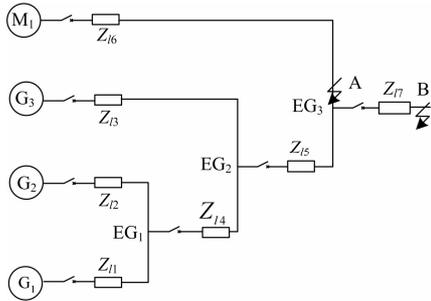


图1 电源分层等效过程示意图

Fig. 1 Schematic of the layered equivalent method

2 发电机对称分量等值电路

在船舶电网短路电流计算中,考虑到发电机和电动机数量多、电网结构复杂、发电机励磁及调速系统影响等,进行精确计算耗时费力,需要做一定简化。本文假设:故障期间励磁电压恒定,转子速

度不变且等于故障前额定转速;直轴回路阻抗值与交轴回路阻抗值相同;直轴与交轴回路时间常数相同,并忽略故障电流的谐波分量。

根据发电机双反应理论,对三相短路电流进行分析可得到暂态正序等值回路。同步电机突然三相短路后的实际定子电流为^[6]

$$i_a = \left\{ \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right\} \cdot \sqrt{2} E \cos(\omega t + \theta - \frac{\pi}{2}) - \quad (1)$$

$$\sqrt{2} E e^{-\frac{t}{T_a}} \left[\left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cos(2\omega t + \theta - \frac{\pi}{2}) \right] + i_{al}$$

其中: E为故障前同步电机相电压有效值; X_d^{''}、X_d[']、X_d为直轴次暂态、暂态及同步电抗; X_q^{''}为交轴次暂态电抗; T_d^{''}、T_d[']为直轴次暂态及暂态时间常数; T_a为电枢时间常数; ω为发电机角速度; θ为t=0时的相角; i_{al}为故障前负荷电流,假设等于零; t为故障持续时间。

由于隐机同步电机转子是圆柱形整体,并具有很强的阻尼绕组作用,可以认为交直流轴次暂态电抗相等^[6],则式(1)简化为

$$i_a = \sqrt{2} E \left[\frac{\cos(\omega t + \theta - \frac{\pi}{2})}{X_{1(t)}} - \frac{\cos(\theta - \frac{\pi}{2}) e^{-\frac{t}{T_a}}}{X_d'} \right] \quad (2)$$

右侧第一项括号中为发电机运算电抗的倒数

$$X_{1(t)} = \left\{ \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right\}^{-1} \quad (3)$$

由于对应暂态交流分量的正序电抗等于 X_{1(t)},则发电机对称分量正序等值回路如图2所示^[9]。

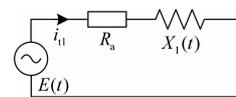


图2 等效发电机暂态对称分量正序等值电路

Fig. 2 Positive sequence circuit of EG transient symmetrical component

其中: i_{t1}为发电机正序电流;电枢电阻 R_a是与电感串联的电阻分量;正序时变电感 L_{1t}=X_{1t}/ω, L₁₍₀₎为 L₁₍₀₎在故障发生瞬间的值,正序回路暂态直流分量

时间常数 T_a 由 $L_{1(0)}/R_a$ 给出。

由于励磁及阻尼回路电阻与电抗相比很小, 可忽略不计, 通过阻尼回路的倍频到基频电流几乎不衰减, 负序电感几乎等于次暂态电感, 因此发电机暂态负序等值回路如图 3(a)。发电机中性点直接接地时, 零序等值回路如图 3(b)。

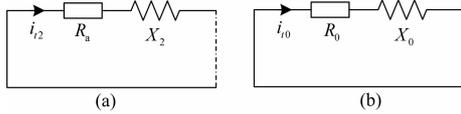


图3 发电机暂态对称分量负序及零序等值电路

Fig. 3 Negative and zero sequence circuit of EG transient symmetrical component

其中: i_{2} 、 i_{0} 为发电机负序和零序电流; X_2 、 X_0 为发电机负序及零序电抗; R_0 为零序电阻。通过发电机对称分量等值回路, 使得各种不对称短路电流分析成为可能。

3 各种故障情况下暂态短路电流计算

高阻接地方式因其故障电流小, 可有效抑制间歇弧光接地过电压, 而且结构相对简单等优点, 比较适用于船舶中压电网。该接地方式下, 单相接地短路时必须考虑系统分布电容的影响。工程上一般采用 Γ 型或 Π 型集中参数来分析电容对基频电气量的影响, 本文采用 Γ 型集中参数表达发电机、变压器、电缆线路等的分布电容。

3.1 三相短路

高阻接地方式的船舶电网发生三相短路时与直接接地方式相同, 正序网如图 2 所示, 边界条件为 $R=R_a$, $L=L_{1(t)}$, $i_{2}=i_{0}=0$, 可得

$$Ri_{1} + L \frac{di_{1}}{dt} = E(t) \quad (4)$$

此为一阶线性变系数非齐次常微分方程, 与正弦电压源 RL 串联回路方程相似。短路电流暂态交流分量 $i_{1(ac)}$ 可由其频域形式求解为

$$i_{1(ac)} = \frac{\sqrt{2}E [R \cos(\omega t + \theta) + \omega L \sin(\omega t + \theta)]}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (5)$$

然后用短路发生瞬间即 $t=0$ 时刻的正序电感 $L_{1(0)}$ 以及 $i_{1(ac)} + i_{1(dc)} = 0$ 的初始条件可求得短路电流的暂态直流分量为

$$i_{1(dc)} = -\sqrt{2}E \frac{R \cos \theta + \omega L_{1(0)} \sin \theta}{R^2 + \omega^2 L_{1(0)}^2} e^{-\frac{R}{L_{1(0)}} t} \quad (6)$$

则 a 相短路电流为

$$i_{ka} = \sqrt{2}E \left[\frac{R \cos(\omega t + \theta) + \omega L_t \sin(\omega t + \theta)}{R^2 + \omega^2 L_t^2} + \frac{R \cos \theta + \omega L_0 \sin \theta}{R^2 + \omega^2 L_0^2} e^{-\frac{R}{L_0} t} \right] \quad (7)$$

将 θ 替换为 $\theta - 2\pi/3$ 和 $\theta + 2\pi/3$ 分别可得 b 相和 c 相短路电流 i_b 和 i_c 。

3.2 两相短路

中性点经高阻接地或不接地方式的船舶电网, 假设 bc 两相短路, 复合序网如图 4。边界条件为 $R=2R_a$, $L_t=L_{1(t)}+X_2/\omega$, $i_{1}+i_{2}=0$, $i_{0}=0$, 将该条件代入方程 (4), 用同样的方法可求 b 相短路电流 i_{kb} , 如式 (8), c 相短路电流与之大小相等, 方向相反。

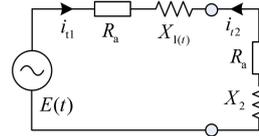


图4 两相短路复合序网

Fig. 4 Composite sequence network of 2LS

$$i_{kb} = \sqrt{6}E \left[\frac{R \sin(\omega t + \theta) - \omega L_t \cos(\omega t + \theta)}{R^2 + \omega^2 L_t^2} + \frac{\omega L_0 \cos \theta - R \sin \theta}{R^2 + \omega^2 L_0^2} e^{-\frac{R}{L_0} t} \right] \quad (8)$$

3.3 单相接地短路

高电阻接地方式或不接地方式的船舶电网, 单相短路时必须考虑系统分布电容的影响。假设系统每相总电容为 C_0 , 中性点接地电阻为 R_n , 则 a 相接地时, 其对称分量复合序网如图 5。

由于负序电势为零, 实际上负序网完全被短接。又考虑到正序电阻远小于其电抗分量, 以及零序阻抗与中性点接地电阻相比可以忽略, 在假定的电流方向下, 图 5 可改成图 6 的形式, 其中 $L=L_{1(0)}$, $C=2C_0$ 。

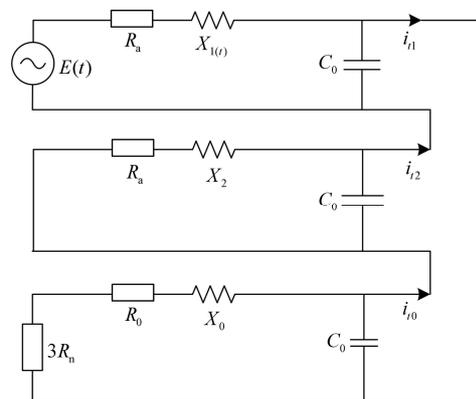


图5 单相接地短路复合序网

Fig. 5 Composite sequence network of 1LG

该电路实为一个正弦 RLC 电路。

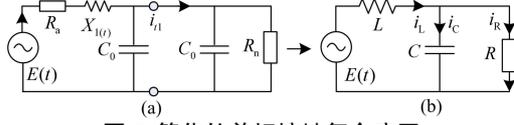


图 6 简化的单相接地复合序网

Fig. 6 Simplified composite sequence network of 1LG

由图 6(b)可得求解该电路的时域方程为

$$\begin{cases} i_L = i_C + i_R \\ L \frac{di_L}{dt} + 1/C \int i_C dt = E(t) \\ Ri_R = 1/C \int i_C dt \end{cases} \quad (9)$$

假设各元件电流 i_L, i_C 和 i_R 所对应的电流相量为

\dot{I}_L, \dot{I}_C 和 \dot{I}_R ，则根据式(9)的频域方程可求得

$$\begin{cases} \dot{I}_R = \frac{\dot{E}}{j\omega L - \omega^2 LCR + R} \\ \dot{I}_C = \frac{j\omega CR \dot{E}}{j\omega L - \omega^2 LCR + R} \\ \dot{I}_L = \frac{(1 + j\omega CR) \dot{E}}{j\omega L - \omega^2 LCR + R} \end{cases} \quad (10)$$

从而可求图 6(b)中各电流的交流分量为

$$i_{Rac} = \frac{\sqrt{2}E \left[(R - \omega^2 LCR) \cos(\omega t + \theta) + \omega L \sin(\omega t + \theta) \right]}{(\omega L)^2 + (R - \omega^2 LCR)^2} \quad (11)$$

$$i_{Cac} = \frac{\sqrt{2}E \left[\omega^2 LCR \cos(\omega t + \theta) - \omega CR (R - \omega^2 LCR) \sin(\omega t + \theta) \right]}{(\omega L)^2 + (R - \omega^2 LCR)^2} \quad (12)$$

$$i_{Lac} = i_{Rac} + i_{Cac} \quad (13)$$

然后用短路发生瞬间即 $t=0$ 时刻的正序电感 $L=L_{(0)}$ 求暂态直流分量为方程(14)的通解。

$$\begin{cases} i_{Ldc} = i_{Cdc} + i_{Rdc} \\ L \frac{d^2 i_{Ldc}}{dt^2} + 1/C i_{Cdc} = 0 \\ R di_{Rdc}/dt = 1/C i_{Cdc} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得二阶线性齐次微分方程

$$LC \frac{d^2 i_{Ldc}}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{di_{Ldc}}{dt} + i_{Ldc} = 0 \quad (15)$$

方程(15)的两个特征根为

$$r_{1,2} = \frac{-1}{2CR} \pm \sqrt{\frac{L - 4CR^2}{4LC^2 R^2}} \quad (16)$$

高阻接地方式下, $L - 4CR^2 < 0$ 一般是成立的, 则式(15)的特征根为两个共轭虚根。

$$r_{1,2} = \alpha \pm j\beta = \frac{-1}{2CR} \pm j\sqrt{\frac{4CR^2 - L}{4LC^2 R^2}} \quad (17)$$

则方程(15)的通解为

$$i_{Ldc} = e^{\alpha t} (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t) \quad (18)$$

其中, C_1, C_2 为复系数。

短路瞬间即 $t=0$ 时刻有

$$i_{Lac} + i_{Ldc} = 0 \quad (19)$$

短路瞬间电感中的电流不能突变, 有

$$\frac{di_{Lac}}{dt} + \frac{di_{Ldc}}{dt} = 0 \quad (20)$$

由上面两个边界条件以及式(18)及式(14)可得短路电流直流分量为

$$i_{Ldc} = \sqrt{2}Ee^{\alpha t} \left[A \cos \beta t - \frac{(A\alpha + \omega B)}{\beta} \sin \beta t \right] \quad (21)$$

$$i_{Cdc} = \sqrt{2}ELCe^{\alpha t} \cdot$$

$$\left\{ \left[\frac{\alpha^2 (A\alpha + \omega B)}{\beta} + A\alpha\beta - \omega\beta B \right] \sin \beta t + \right. \quad (22)$$

$$\left. (2\omega\alpha B + A\alpha^2 + A\beta^2) \cos \beta t \right\}$$

$$i_{Rdc} = i_{Ldc} - i_{Cdc} \quad (23)$$

由图 6 可知单相接地短路电流为

$$i_{ka} = 3 \left(i_{Rac} + \frac{i_{Cac}}{2} + i_{Rdc} + \frac{i_{Cdc}}{2} \right) \quad (24)$$

3.4 两相接地短路

经高阻接地的船舶电网, 假设 bc 两相接地短路, 则复合序网如图 7(a)。由于中性点接地电阻及系统容抗远大于发电机各序阻抗, 以及发电机各序电抗远大于其序电阻, 在假定的电流方向下, 图 7(a)可以简化为图 7(b)的形式。其中, $L_1=L_{1(0)}, L_2=X_2/\omega, R=R_n, C=3C_0$ 。

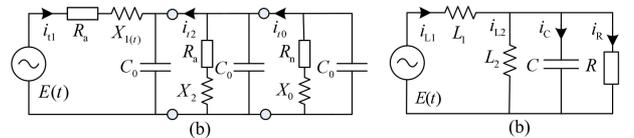


图 7 两相接地短路复合序网及简化电路

Fig. 7 Composite sequence network of 2LG and its simplified circuit

由图 7(b)可得该电路的时域方程为

$$\begin{cases} i_{L_1} = i_{L_2} + i_C + i_R \\ L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} + 1/C \int i_C dt = E(t) \\ Ri_R = 1/C \int i_C dt \\ Ri_R = L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} \end{cases} \quad (25)$$

与单相接地短路一样, 用频域方程求解图 7(b) 中的各电流相量为

$$\begin{cases} \dot{I}_R = \frac{\dot{E}}{j\omega L_1 + R(L_1/L_2 - \omega^2 L_1 C + 1)} \\ \dot{I}_C = \frac{j\omega C R \dot{E}}{j\omega L_1 + R(L_1/L_2 - \omega^2 L_1 C + 1)} \\ \dot{I}_{L_2} = \frac{-jR/(\omega L_2) \dot{E}}{j\omega L_1 + R(L_1/L_2 - \omega^2 L_1 C + 1)} \\ \dot{I}_{L_1} = \frac{[1 + j\omega C R - jR/(\omega L_2)] \dot{E}}{j\omega L_1 + R(L_1/L_2 - \omega^2 L_1 C + 1)} \end{cases} \quad (26)$$

则由图 7(a)可知短路电流的各序交流分量相量形式为

$$\begin{cases} I_{r0(ac)} = -(I_R + I_C/3) \\ I_{r1(ac)} = I_{L_1} - I_C/3 \\ I_{r2(ac)} = -(I_{L_2} + I_C/3) \end{cases} \quad (27)$$

根据对称分量合成方法可求得短路电流的暂态交流分量的相量为

$$\begin{cases} I_{ka(ac)} = 0 \\ I_{kb(ac)} = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})I_{L_1} + (\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})I_{L_2} - I_R \\ I_{kc(ac)} = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})I_{L_1} + (\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})I_{L_2} - I_R \end{cases} \quad (28)$$

从而可求得短路电流的暂态交流分量 $i_{ka(ac)}$, $i_{kb(ac)}$, $i_{kc(ac)}$ 。

与单相接地短路一样, 用短路发生瞬间即 $t=0$ 时刻的正序电感 $L_1=L_{1(0)}$ 求暂态直流分量。此时, 令式(25)中的 $E(t)=0$, 则通过 L_1 的短路电流暂态直流分量为方程 (29) 的通解。

$$L_1 C \frac{d^2 i_{L_1 dc}}{dt} + \frac{L_1}{R} \frac{di_{L_1 dc}}{dt} + (1 + \frac{L_1}{L_2}) i_{L_1 dc} = 0 \quad (29)$$

对比式(29)与式(15), 可知仅第三项的系数多了 L_1/L_2 。与单相接地短路解法一样, 可以求得短路电流的暂态直流分量 $i_{L_1 dc}$, $i_{C dc}$, $i_{R dc}$, $i_{L_2 dc}$, 同式(28)可求短路电流直流分量的各序分量, 从而根据对称分量合成方法可求短路电流暂态直流分量, 最终求得

短路电流 i_{ka} , i_{kb} , i_{kc} 。篇幅所限, 不再详细展开。

4 算例分析

以图 1 的多电源非并联系统进行分析。其中, 发电机 G_1 、 G_2 、 G_3 (三台机相同), 电动机 M_1 以及线路 Z_{l1-7} 参数如表 1。

表 1 系统参数

发电机参数		电动机参数	
S_{rg}/kW	2 000	P_m/kW	500
U_r/V	6 600	U_m/V	6 600
X_d''/Ω	2.439	R_s/Ω	2.251
X_d'/Ω	4.204	R_r/Ω	1.390
X_d/Ω	47.40	X_m/Ω	9.922
T_d''/ms	80.0	T_m''/ms	22.4
T_d'/ms	3.0	T_{dc}/ms	14.08
T_{dc}/ms	20.0	$\eta \cos\phi$	0.76
$\cos\phi$	0.8	线路参数	
R_n/Ω	2.831	Z_{l1-7}/Ω	0.001+j0.001

假设 A 点短路, 则以 A 点为根节点将整个系统等效为一个发电机。从图 1 可知 EG_1 为发电机 G_1 与 G_2 的等效, EG_2 为发电机 G_3 与 EG_2 的等效, EG_3 为电动机 M_1 与 EG_2 的等效。分层等效过程所得发电机参数如表 2。

表 2 分层等效过程所得等效发电机参数

Table 2 Parameter of EG from the layered equivalent method

参数	EG ₁	EG ₂	EG ₃
U_r/V	6 600	6 600	6 600
X_d''/Ω	1.121	0.748	0.698
X_d'/Ω	1.842	1.229	1.230
X_d/Ω	4.914	3.277	3.278
R_s/Ω	0.202	0.135	0.129
T_d''/ms	3.001	3.026	4.972
T_d'/ms	79.98	80.39	81.09
T_{dc}/ms	17.67	17.62	17.25

然后以图 1 中 A 点短路为例验证本文方法。假设中性点接地电阻为 $1\ 500\ \Omega$, 系统总电容 $2.0\ \mu F$ (每相)。对三相短路、两相短路、单相接地短路、两相接地短路分别用本文解析方法、Simulink 连续仿真所得短路电流波形如图 8~图 14, 其中仿真单相接地与两相接地时, 故障及接地电阻均设为 $10^{-4}\ \Omega$ 。

(1) 三相短路

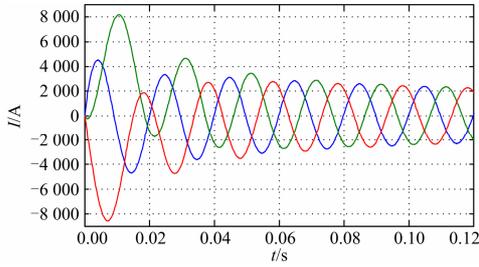


图 8 三相短路解析法波形

Fig. 8 3LS wave from the presented method

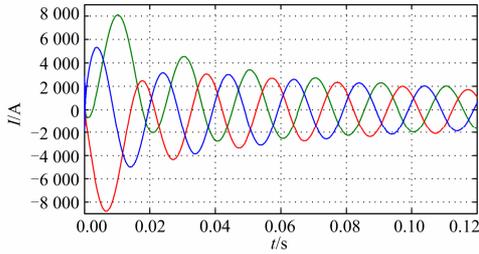


图 9 原系统三相短路 Simulink 仿真波形

Fig. 9 3LS wave of original system from Simulink

(2) 两相短路

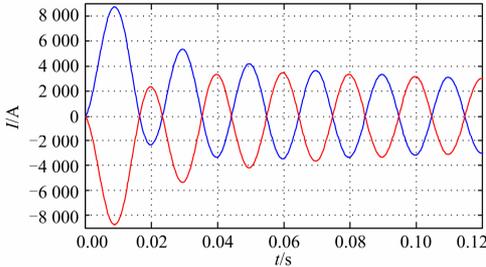


图 10 两相短路解析法仿真

Fig. 10 2LS wave from the presented method

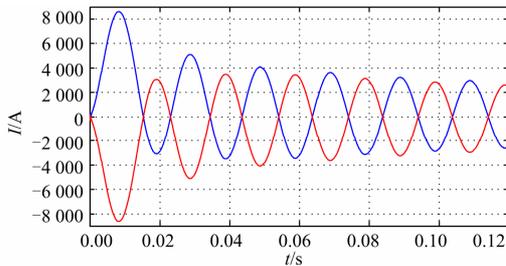


图 11 原系统两相短路 Simulink 连续仿真

Fig. 11 2LS wave of original system from Simulink

(3) 单相接地短路

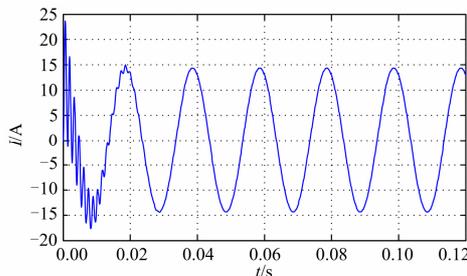


图 12 单相接地短路解析法仿真

Fig. 12 1LG wave from the presented method

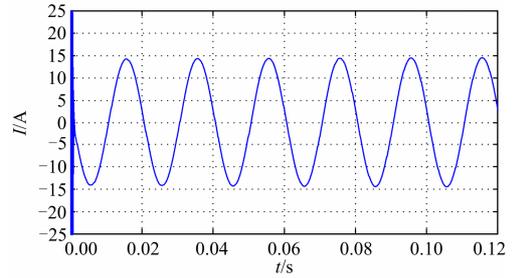


图 13 原系统单相接地短路 Simulink 连续仿真

Fig. 13 1LG wave of original system from Simulink

(4) 两相接地短路

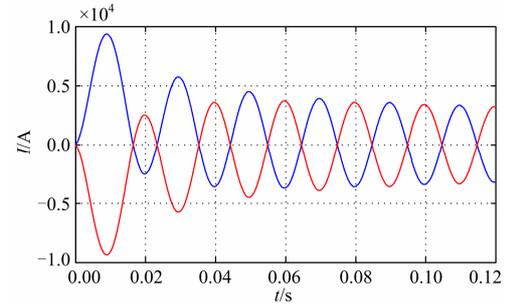


图 14 两相接地短路解析法波形

Fig. 14 2LG wave from the presented method

各种短路情形下本文方法与 Simulink 仿真所得短路电流峰值如表 3 所示。

表 3 短路电流峰值解析法与 Simulink 仿真比较

Table 3 Comparison of peak value of short-circuit current

between the presented and Simulink method

故障类型	三相短路/kA	两相短路/kA	两相接地/kA	单相接地/A
解析法	8.58	8.76	9.40	23.8
仿真法	8.78	8.62	9.30	23.5

从图 8~图 15 以及表 3 可知，本文提出暂态短路电流计算方法与 Simulink 连续仿真对比，等效前后短路电流波形、相位及幅值误差很小，从而验证了本文方法的有效性和精确性。需要指出的是，不仅高阻接地，中电阻和小电阻接地时仍然可以用该方法来计算，限于篇幅具体算例略去。

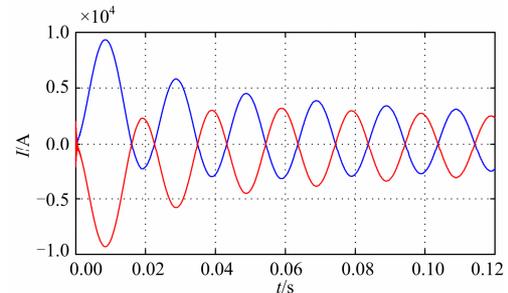


图 15 原系统两相接地短路 Simulink 连续仿真

Fig. 15 2LG wave of original system from Simulink

5 结语

考虑发电机及电动机暂态特性以及系统分布电容, 针对高阻接地的船舶中压电网, 基于电源分层等效及对称分量法, 提出一种系统化的对称及各种非对称暂态短路电流计算方法, 并用 Simulink 仿真予以对比验证。当船舶电网规模较大, 尤其电动机数量较多, 可能的短路点更多, 精确的短路电流计算是一项繁重的任务。本文提出的方法既避免了传统方法的矩阵分解迭代等复杂计算, 又保证了求解的精度, 可以满足船舶中压交流电网短路电流计算的实际需要。

参考文献

- [1] 蒋建东, 魏臻珠, 王晓华. 参数不对称电网故障计算的虚拟端口法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 161-166.
JIANG Jian-dong, WEI Zhen-zhu, WANG Xiao-hua. Fictitious port method for parameter unbalance power system fault calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 161-166.
- [2] 车仁飞, 李仁俊, 李玉忠. 基于叠加原理的配电网短路电流计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 22-25.
CHE Ren-fei, LI Ren-jun, LI Yu-zhong. Short circuit calculation of distribution network based on superposition theorem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 22-25.
- [3] 顾雪平, 杨智龙. 不对称短路时电抗型故障限流器对暂态稳定性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 86-92.
GU Xue-ping, YANG Zhi-long. Influences of reactance-type fault current limiter on power system transient stability with asymmetrical short-circuit faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 86-92.
- [4] Teng J H. Systematic short circuit analysis method for unbalanced distribution systems[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 2005, 152(4): 549-555.
- [5] 顾秀芳, 王红坡. 基于相分量的配电网短路电流通用计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 80-81.
GU Xiu-fang, WANG Hong-po. Research on general method for calculating short-circuit fault current of distribution network based on phase component[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 80-81.
- [6] 田华, 王卿, 朱峰, 等. 基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 56-60.
TIAN Hua, WANG Qing, ZHU Feng, et al. Comparative study of short-circuit current calculation results based on PSASP software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 56-60.
- [7] Hwang H H. Transient analysis of simultaneous unbalanced short circuits of synchronous machines[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(4): 1254-1257.
- [8] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
GAO Jing-de, WANG Xiang-hang, LI Fa-hai. AC machines and system analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [9] IEC 61363 procedures for calculating short-circuit currents in three phase a.c.[S]. 1998.
- [10] 王寓, 王主丁, 张宗益, 等. 国内外常用短路电流计算标准和方法的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 148-152.
WANG Yu, WANG Zhu-ding, ZHANG Zong-yi, et al. Comparison and research on the commonly used standards and methods of short-circuit current calculation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 148-152.
- [11] Kai Takaaki. A simplified fault currents analysis method considering transient of synchronous machine[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1997, 12(3): 225-231.
- [12] 甄洪斌, 张晓锋, 沈兵, 等. 复杂结构船舶交流电力系统短路电流计算研究[J]. 中国修船, 2008, 21(4): 9-12.
ZHEN Hong-bin, ZHANG Xiao-feng, SHEN Bing, et al. Study in short-circuit current calculation of shipboard AC power systems with complex structure[J]. China Ship Repair, 2008, 21(4): 9-12.
- [13] 翁蓝天, 茹立鹏, 刘开培, 等. 基于等效电源法的树型配电网短路计算[J]. 武汉大学学报, 2008, 41(3): 113-117.
WENG Lan-tian, RU Li-peng, LIU Kai-pei, et al. Algorithm for short circuit calculation of dendriform distribution network based on equivalent power source method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(3): 113-117.
- [14] 翁蓝天. 链表拓扑环境下基于配网结构特点的多源有环短路计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 150-157.
WENG Lan-tian. Multi-power short circuit calculation on middle and lower voltage distribution grid's structure characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 150-157.

收稿日期: 2013-04-22; 修回日期: 2013-08-14

作者简介:

张彦魁(1973-), 男, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: lantingzhixi@126.com

毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。