

基于直流区域配电的船舶电网潮流计算

胡健, 杨宣访, 陈帆, 周清锋

(海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 考虑到船舶直流区域配电网络与传统船舶配电网络在结构和电制上存在的差异, 根据船舶直流区域配电网络的数学模型, 提出一种新的潮流计算方法。针对直流网络的特点, 将前推回代法和牛顿拉夫逊法做了变形, 并对船舶直流区域配电网络进行了分层处理。利用改进之后的船舶直流网络潮流计算方法, 分别对各层单独计算。最后通过对某船直流区域配电网络实例进行计算分析, 验证了该方法的正确性。

关键词: 直流网络; 区域配电; 潮流计算; 前推回代法; 牛顿-拉夫逊法

Power flow calculation based on the ship DC regional distribution network

HU Jian, YANG Xuan-fang, CHEN Fan, ZHOU Qing-feng

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Considering the difference between the ship DC regional distribution network and traditional ship distribution network in the structure and power model, based on the mathematical model of ship DC zonal power distribution network, this paper puts forward a new kind of method for load flow calculation. According to the characteristics of DC power system, it makes some change in forward backward method and Newton-Raphson algorithm and separates the the ship DC regional distribution network into two parts. The improved DC network power flow calculation method of the ship is used to respectively calculate each part. At last a ship DC regional distribution network example is calculated and analyzed, which validates the correctness of the method.

Key words: DC power system; regional distribution network; load flow calculation; forward backward method; Newton-Raphson algorithm

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0020-05

0 引言

潮流计算是进行网络分析的基础, 其中配电网潮流计算是确保配电网安全运行的前提。目前配电网普遍采用的是交流电制, 相应潮流计算方法也是以交流为主, 主要的方法有三种: 前推回代法^[1-3], 回路阻抗法^[4-6], Zbus 法^[7]。然而, 使用直流配电技术能避免发电机同步匹配的问题, 提高发电机并网能力, 同时减小线路损耗。采用直流方式配电后, 潮流计算的对象主要就以直流网络为主, 不存在电压相角和无功功率的概念, 网络中包含直流电路 DC-DC 直流斩波器和 DC-AC 逆变器等, 因此对船舶直流配电网络的潮流计算方法提出了新的要求, 直流配电网络潮流计算的相关研究工作也得到相应开展。

另一方面, 在船舶电力系统对生命力、安全性要求越来越高的背景下, 区域配电技术比传统船舶

干线式、馈线式、环线式配电网络更符合船舶电力系统的需求, 是船舶综合电力系统配电网络的发展趋势^[8-9]。与现有船舶配电网络结构相比, 区域配电网络结构具有不同的特点^[10]。结合船舶直流区域配电网络的特点, 提出相应的潮流计算方法。

本文主要工作是在原有的潮流计算基础上根据直流网络的特点对计算方法做出改进; 再根据船舶区域配电网络结构的特点进行分层, 对不同网络层采用改进直流前推回代法和直流牛顿拉夫逊法进行计算。

1 船舶直流区域配电网络潮流计算

对船舶直流区域配电网络进行分层分析: 一层是各区内部的辐射型网络层; 另一层是各区域相互联通时环形网络层。对辐射型网络层采用直流前推回代法, 这样处理求解速度快, 而且编程简单。然而该方法在处理 PV 节点 (直流系统中的 P 节点)

时, 需要使用补偿方法处理, 且处理网孔能力较差, 不适合环形网络部分, 所以对环形网络层进行计算时, 保留前推回代法结果, 利用改进的直流网络牛顿拉夫逊法进行计算。

1.1 辐射型网络层

在对区域配电网辐射层做直流系统的潮流计算时, 对文献[3]中交流迭代方法进行直流变形, 并考虑直流换流器模型。

回代求解各支路潮流功率 P_{ij} , 各节点电压和电流 I_{ij} 为已知量。

(1) 当支路 ij 直接下层支路不含有变流器时, 第 K 步迭代支路功率的表达式为

$$\begin{cases} P_{ij}^{(k+1)} = P_j^{(k)} + \sum_{l \in j} P_{jl}^{(k+1)} + (PL_{ij}^{(k+1)})' \\ (PL_{ij}^{(k+1)})' = R_{ij} \times \frac{\sum_{l \in j} P_{jl}^{(k+1)} + P_j^{(k)}}{V_i^{(k+1)}} \end{cases} \quad (1)$$

其中: P_{ij} 为支路 ij 功率; P_j 为节点 j 的注入功率; $\sum_{l \in j} P_{jl}$ 为支路 ij 的所有直接下层支路功率之和; $(PL_{ij}^{(k+1)})'$ 为功率损耗, 利用到前次迭代电压, 因此带上标撇以区别。

(2) 当支路 ij 直接下层支路连接逆变器, 逆变器位于支路 jm 上, 支路功率表达式为

$$\begin{cases} P_{ij}^{(k+1)} = P_j^{(k)} + \sum_{l \in j, l \neq m} P_{jl}^{(k+1)} + P_{jm}^{(k+1)} = \\ P_j^{(k)} + \sum_{l \in j, l \neq m} P_{jl}^{(k+1)} + V_m^{(k+1)} \sum_{l \in j, l \neq m} \frac{3\sqrt{2}k_\gamma I_{lj}}{\pi} \end{cases} \quad (2)$$

考虑换相重叠角的缘故, 取 $k_\gamma=0.995$, 在直流区域配电网中, 换流器输出输入端所连接的母线可以看成是电压值指定的 V 节点; 当换流器与末端负载连接时, 节点看成是 P 节点。

(3) 当支路 ij 直接下层支路含有斩波器时, 设斩波器位于支路 jm 上, 支路功率表达式为

$$\begin{cases} P_{jm}^{(k+1)} = (1 - \eta) P_m^{(k)} + V_m^{(k+1)} \left(V_{sp} \sum_{l \in j} G_{ml} \right) \\ P_j^{(k+1)} = \sum_{k \in m} G_{jk} V_{jk}^2 + P_{jm}^{(k+1)} \end{cases} \quad (3)$$

其中: V_{sp} 是指定电压; η 为转换效率, G_{ml} 是系统导纳矩阵。

前推求解各节点电压时, 支路潮流功率 P_{ij} 为已知量。

(1) 当支路 ij 直接下层支路不含有变流器时, 节点电压, 支路电流关系式为

$$\begin{cases} V_i^{(k+1)} = V_j^{(k+1)} - I_{ij}^{(k+1)} R_{ij} \\ I_{ij}^{(k+1)} = P_{ij}^{(k+1)} / V_j^{(k+1)} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 当支路 ij 直接下层支路含逆变器, 设逆变器位于支路 jm 上, 节点电压支路电流关系式为

$$\begin{cases} V_m^{(k+1)} = V_n^{(k+1)} - I_{mn}^{(k+1)} R_{mn} \\ V_j^{(k+1)} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B T V_m^{(k+1)} \cos \theta + \frac{3}{\pi} \sum_{n \in m} X_{mn} I_{mn} \end{cases} \quad (5)$$

其中: V_m 为交流侧线电压; θ 是逆变器熄弧角; X 为电抗矩阵; B 是换流器桥数; T 为换流器变比。

(3) 当支路 ij 直接下层支路含斩波器, 设斩波器位于支路 jm 上, 节点电压支路电流关系式为

$$\begin{cases} V_j = V^{sp} \\ I_{ij}^{(k+1)} = P_{ij}^{(k+1)} / V^{sp} \end{cases} \quad (6)$$

前推回代收敛条件为

$$\begin{cases} \max \left\{ \left| V_i^{(n+1)} - V_i^{(n)} \right| \right\} < \varepsilon_1 \\ \max \left\{ \left| P_i^{(n+1)} - P_i^{(n)} \right| \right\} < \varepsilon_2 \end{cases} \quad (7)$$

1.2 环形网络层

直流网络的功率方程表示为

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n G_{ij} V_j \quad (8)$$

式中: P_i 为节点 i 的功率; V_i 为节点 i 的电压; V_j 为所有与节点 i 相连的节点的电压; G_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间电导。

在计算船舶区域配电网结构潮流时, 直流系统网络功率的牛顿拉夫逊计算方法由传统交流系统的 P, Q, V, θ 四个变量变成了 P, V 两个变量, 因此在交流系统中的 PV 节点和 PQ 节点在直流系统中相应地改为 V 节点和 P 节点。V 节点是母线电压为指定值的节点, P 节点是母线注入功率为指定值的节点。

设系统中 1, 2, ..., m 号节点为 P 节点, 第 i 个节点的给定功率设为 P_{is} , 当不含有变流器的情况时, 可列写方程:

$$\begin{aligned} \Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - V_i \sum_{j=1}^n G_{ij} V_j \\ (i = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (9)$$

对于电压给定的 V 节点, 节点电压不必参加迭代。所以包含了 m 个方程, 待求变量也是 m 个, 为

V_1, V_2, \dots, V_m 。

修正方程式为

$$\Delta P = -J_{dc} \Delta V \quad (10)$$

式中

$$J_{dc} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_m} \\ \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_m}{\partial V_1} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial V_m} \end{bmatrix}$$

其中，雅克比矩阵 J_{dc} 的元素为

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_m} = \begin{cases} V_k G_{km} & m \neq k \\ P_k / V_k + V_k G_{km} & m = k \end{cases} \quad (11)$$

当计及变流器时，假设变流器位于 ij 支路上，系统中有 m 个 P 节点，根据文献[11-13]等值迭代的思想得修改后的系统雅克比矩阵为

$$J_{dc} = \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} & \dots & J_{1,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{i,1} & J_{i,2} & J_{i,j+1} + V_j G_{j,j+1} & J_{i,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{m,1} & J_{m,2} & \dots & J_{m,m} \end{bmatrix} \quad (12)$$

在雅克比矩阵 J_{dc} 中，第 $(i, j+1)$ 位置处元素改为 $J_{i,j+1} + V_j G_{j,j+1}$ 。

收敛条件为

$$\max \Delta P_i^{(k)} < \varepsilon$$

2 算例

图 1 是某船舶直流区域配电网络，各区域由两个兆瓦级的直流变流器提供电力。图 2 是其中一个区域的网络结构图，直流变流器与直流母线连接，

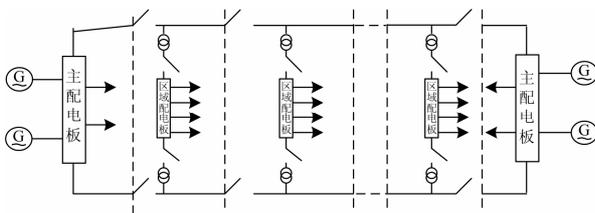


图 1 某船舶直流区域配电网络图

Fig. 1 A ship power distribution structure

母线电压为指定值，逆变器 and 斩波器后面带交流负载和直流负载，注入功率为指定值。

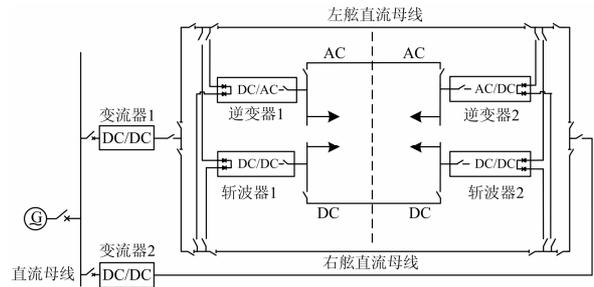


图 2 某船舶单个直流区域配电网络图

Fig. 2 A DC zonal power distribution structure

以直流变流器为界，之后的部分为辐射型网络层，之前为环形网络层，分别用直流前推回代法和直流牛顿拉夫逊方法计算。

对辐射网络部分进行编号，示意图如图 3，其中根节点 0 节点为直流变流器的输出端，是指定电压值 V 节点，斩波器输出电压为直流指定值，逆变器输出电压是交流指定值，节点 3、4、5、6 为直接与负载相连的节点，因此看作是指定功率值的 P 节点。支路电阻通过查表参考不同电流值的船用电缆在 20°C 时电阻值。前推回代法计算结果见表 1~表 3，表 2 和表 3。计算结果取标么值。

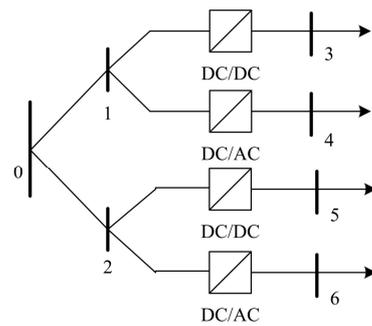


图 3 辐射网络部分的节点编号示意图

Fig. 3 The number of node for radial distribution

对于整个船舶网络，在用前推回代法计算完辐射网络层的基础上，对环形网络层计算时用直流牛顿拉夫逊方法。如图 4 对环形网络部分进行编号，图中 6 节点的下层为区域配电网络 4 个辐射层组成，可直接等效为负荷节点 P 节点。变流器为兆瓦级斩波器。

支路电阻参考不同电流值的船用电缆在 20°C 时电阻值。直流牛顿法计算结果见表 4 和表 5。其中，节点 1、2、3、4 为 V 节点。设定收敛条件 $\max \Delta P_i^{(k)} < 1 \times 10^{-5}$ ，经过 9 次迭代后得到结果，此时

收敛精度: $\max \Delta P_i^{(k)} = 9.901 \times 10^{-6}$ 。

表 1 辐射网络层前推回代法计算支路电流计算结果

Table 1 Branch current calculation result by using forward backward method in radiation network layer

次数	I_{01}/pu	I_{02}/pu	I_{13}/pu	I_{14}/pu	I_{25}/pu	I_{26}/pu
1	2.747 15	2.325 06	0.276 69	2.470 46	0.207 52	2.117 54
2	2.754 32	2.325 59	0.277 41	2.476 91	0.207 98	2.122 21
3	2.754 34	2.330 20	0.277 42	2.476 92	0.207 98	2.122 22
4	2.754 34	2.330 20	0.277 42	2.476 92	0.207 98	2.122 22

表 2 辐射网络层前推回代法节点电压计算结果

Table 2 Node voltage calculation result by using forward backward method in radiation network layer

$V_0(4)/pu$	$V_1(4)/pu$	$V_2(4)/pu$	$V_3(4)/pu$	$V_4(4)/pu$	$V_5(4)/pu$	$V_6(4)/pu$
3.043 48	3.035 54	3.036 76	1.000 00	1.739 13	1.000 00	1.739 13

表 3 辐射网络层前推回代法节点功率计算结果

Table 3 Node power calculation result by using forward backward method in radiation network layer

$P_0(4)/pu$	$P_1(4)/pu$	$P_2(4)/pu$	$P_3(4)/pu$	$P_4(4)/pu$	$P_5(4)/pu$	$P_6(4)/pu$
15.437 16	8.360 90	7.076 26	0.800 00	7.000 00	0.600 00	6.000 00

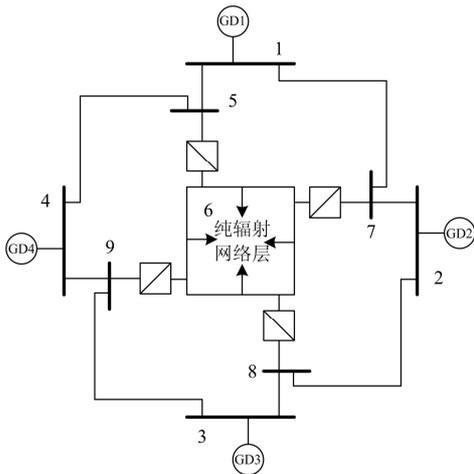


图 4 环形网络层的节点编号示意图

Fig. 4 The number of node for link distribution

表 4 环形网络层牛顿法计算结果 1

Table 4 Calculation result 1 by using Newton-Raphson algorithm in looped network layer

节点号	电压值	节点功率
1	1.200 0	0.636 09
2	1.200 0	0.636 09
3	1.200 0	0.636 09
4	1.200 0	0.636 09
5	1.199 7	0.270 83
6	0.233 3	0.257 29
7	1.199 7	0.270 83
8	1.199 7	0.270 83
9	1.199 7	0.270 83

表 5 环形网络层牛顿法计算结果 2

Table 5 Calculation result 2 by using Newton-Raphson algorithm in looped network layer

支路号	电流值	支路功率
5 6	1.102 65	0.012 86
7 6	1.102 65	0.012 86
8 6	1.102 65	0.012 86
1 5	0.116 07	0.047 22
1 7	0.116 07	0.047 22
2 7	0.116 07	0.047 22
2 8	0.116 07	0.047 22
3 8	0.116 07	0.047 22
3 9	0.116 07	0.047 22
4 9	0.116 07	0.047 22
4 5	0.116 07	0.047 22
9 6	1.102 65	0.012 86

3 结语

针对船舶直流区域配电的特点, 本文采用分层分析的方法, 将船舶直流区域配电网按照物理结构分为辐射网络层和环形网络层, 通过给出的直流网络与传统交流网络的不同模型, 分别采用改进的前推回代法和直流网络的牛顿拉夫逊法进行求解计算。通过某船舶例子表明所提方法能快速、准确地对船舶直流区域配电网进行实时的潮流计算。

参考文献

[1] 李如琦, 谢林峰, 王宗耀, 等. 基于节点分层的配网潮流前推回代方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 33(14): 63-67.

- LI Ru-qi, XIE Lin-feng, WANG Zong-yao, et al. Back/forward substitution method for radial distribution loadflow based on node-layer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 63-67.
- [2] 顾晨, 乐秀璠, 张晓明. 基于改进前推回代法的弱环配电网三相潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 160-164.
GU Chen, LE Xiu-fan, ZHANG Xiao-ming. Study on convergence of back forward sweep distribution power flow[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 160-164.
- [3] 孙宏斌, 张伯明. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26-29.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming. Study on convergence of back/forward sweep distribution power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.
- [4] 刘耀年, 李国鹏. 基于回路阻抗法的配电网潮流计算[J]. 继电器, 2004, 32(8): 8-10.
LIU Yao-nian, LI Guo-peng. Load flow algorithm for distribution network based on loop-impedance method[J]. Relay, 2004, 32(8): 8-10.
- [5] GOSWAMI S K, BASU S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [6] 王守相, 阮同军, 刘玉田. 配电网潮流计算的回路阻抗法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 12-16.
WANG Shou-xiang, RUAN Tong-jun, LIU Yu-tian. Distribution system power flow based on loop-impedance equations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1998, 10(1): 12-16.
- [7] 孙健, 江道灼. 基于牛顿法的配电网 Zbus 潮流计算方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 40-44.
SUN Jian, JIANG Dao-zhuo. A Zbus power flow calculation method for distribution network based on Newton method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 40-44.
- [8] 胡亮灯, 叶志浩, 方明. 舰船综合电力系统智能保护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 94-99.
HU Liang-deng, YE Zhi-hao, FANG Ming. Study on convergence of back forward sweep distribution power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 94-99.
- [9] 唐剑飞, 桂永胜. 舰船电力系统国内外最新进展和发展趋势[J]. 船电技术, 2009(3): 20-24.
TANG Jian-fei, GUI Yong-sheng. Latest development and trend of shipboard power system[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2009(3): 20-24.
- [10] 韩旗. 区域配电网在舰船电力推进系统中应用与发展[J]. 船电技术, 2011(2): 33-36.
HAN Qi. Application and development of electric distribution network in warship electric propulsion system[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2011(2): 33-36.
- [11] 康军. 舰船综合电力系统潮流算法研究与状态估计探讨[D]. 武汉: 海军工程大学, 2009.
KANG Jun. Some issues on load flow algorithm and state estimation in shipboard integrated power systems[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2009.
- [12] TZENG Y S, CHEN N M, WU R N. A detailed R-L fed bridge converter model for power flow studies in industrial AC-DC power system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(5): 531-538.
- [13] 徐政. 交流等值法交直流电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(3): 1-6.
XU Zheng. AC equivalent approach for AC/DC power system load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(3): 1-6.

收稿日期: 2013-12-19; 修回日期: 2014-04-09

作者简介:

胡健(1990-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统安全分析与控制研究。E-mail: 506103274@qq.com