

基于 BPA 数据的交流系统谐波阻抗等值方法 研究与应用

吴方劼¹, 史梦梦², 胡志坚², 王小飞², 陈 彬², 汤 鹏², 邱骁奇²

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209; 2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 换流站母线处谐波阻抗值可为直流输电系统中滤波器的设计提供参数依据, 对抑制系统谐波至关重要。在完善发电机、变压器、线路、母线负荷等电气元件谐波阻抗模型的基础上, 研究基于中国版 BPA 数据的系统谐波阻抗等值计算方法。提出基于半动态-遗传算法的节点编号优化方法, 利用连线矩阵改进节点导纳矩阵的形成, 采用稀疏矩阵技术中的排零存储和排零运算提高程序的运行效率。用 PSCAD 对标准的 IEEE 9 节点系统进行仿真, 验证了所提方法的正确性和有效性。根据电网 BPA 数据, 对某特高压直流输电工程的谐波阻抗进行阻抗扫描, 在 $N-0$ 、 $N-1$ 及 $N-2$ 开断方式下分别对丰大、丰小、枯大、枯小运行方式进行谐波阻抗计算, 得到了阻抗随频率变化的阻抗图及扇形包络图, 为该地区特高压直流输电系统的交流滤波器参数设计提供了依据。

关键词: 谐波阻抗; 等值; 特高压输电; 元件阻抗模型; BPA 数据; 半动态-遗传算法

中图分类号: TM 762

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.023

0 引言

特高压直流输电工程换流站接入系统的边界条件复杂, 运行方式多样, 合理确定用于交流滤波器设计的谐波阻抗等值参数, 能够实现交流滤波器方案的合理配置^[1-6], 同时也是研究高压直流输电 (HVDC) 系统谐波不稳定的关键^[7-8]。现代电力系统节点数成千上万, 节点方程规模庞大, 因而研究一种既能高效处理大型矩阵, 又能兼顾考虑电力网络中运行方式变化所引起的网络拓扑结构变化的谐波阻抗计算方法显得尤为重要。

加拿大太西蒙公司开发的 NIMSCAN 程序是目前世界上使用最广泛的谐波阻抗等值程序, 该程序通过扫描 BPA 数据对系统阻抗进行计算, 但扫描过程过于繁琐^[9], 且没有核心源代码, 特别是随着电网电压等级的增加、新元件的出现, 现有计算平台无法有效应对后续的模式升级, 已越来越不适应现代系统的计算。因此, 开发符合我国实际电网的谐波阻抗计算软件十分必要, 对实现我国直流输电工程自主化设计具有重要意义^[10]。

文献[11]研究推导了变压器、发电机的数学模型, 但没有对整个系统的等值做进一步研究。文献[9, 12-13]给出了计算谐波阻抗的方法, 却没有研究开断线路的影响, 也缺少对某一特定频次下系统阻

抗的分析。在滤波器设计中, 需要提供观察点在各种不同运行方式下的阻抗扫描范围。文献[14]推导了稀疏矩阵的 LU 分解公式, 但没有针对电力系统中导纳矩阵的对称性进行细化研究。文献[15-16]介绍了传统的节点导纳矩阵的生成方法, 文献[17]采用邻接矩阵表示设备与进出线之间的连接关系, 本文将该方法进行了改进, 得到连线矩阵, 应用于节点编号优化和节点导纳矩阵的形成, 以减小程序的计算量。

本文基于 BPA 数据^[18], 采用电力系统各元件典型谐波模型^[19], 由改进的节点法得到导纳矩阵 Y , 根据 $YV=I$, 由单位电流注入法, 计算得到 V , 即所需节点的等值谐波阻抗。为充分利用节点导纳矩阵的稀疏特性, 减少不必要的计算以提高求解效率, 本文提出基于半动态-遗传算法的节点编号优化方法, 并采用排零存储和排零运算技术^[20]进一步提高谐波阻抗计算程序的运行速度。对标准 IEEE 9 节点系统进行计算, 将计算结果与该系统在 PSCAD 下的仿真结果进行对比分析。同时对湖南长沙特高压直流工程进行谐波阻抗计算, 得到其可能发生的谐振频次, 接着计算了该频次所有运行方式下 ± 20 Hz 范围内的阻抗值, 得到该频次下的阻抗包络图, 以此作为该直流工程滤波器调谐点和参数设计的输入条件。

1 元件的谐波阻抗模型

进行谐波分析时, 准确的元件模型是保证获得精确、可靠结果的关键因素。在研究 BPA 中元件模型的基础上, 参考各种典型的元件谐波阻抗模型, 采

收稿日期: 2015-04-07; 修回日期: 2016-03-29

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (2011-0141110032)

Project supported by the Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China (201101411-10032)

用的元件模型如下。

1.1 同步发电机

忽略集肤效应对电阻的影响,采用发电机次暂态电抗。等值电路如图 1 所示。

发电机 h 次谐波下的阻抗表达式为:

$$Z_G(h) = R_a + jhX_d'' \quad (1)$$

其中, R_a 为发电机电枢电阻;

X_d'' 为发电机在基频下的次暂态电抗; h 为谐波次数。

1.2 变压器

变压器 π 型等值电路如图 2 所示,与发电机相同,忽略集肤效应的影响, h 次谐波下变压器阻抗可以用式(2)统一表达:

$$Z_T(h) = R_T + jhX_T \quad (2)$$

其中, R_T 为变压器短路电阻;

X_T 为变压器短路电抗。图 2 中 k_T 为变压器变比。

1.3 输电线路

由于 BPA 中线路给出的是集中参数数据,故在计算等值阻抗时,输电线路也采用集中参数模型,如图 3 所示。图中, R_L 为线路总电阻; X_L 为线路总电抗; B_1 为线路 i 端电纳; B_2 为线路 j 端电纳。

$B_1 = B_2$ 时,为对称线路;

$B_1 \neq B_2$ 时,为不对称线路。

1.4 负荷

BPA 潮流数据中负荷模型是已知负荷吸收功率的,电网中绝大部分负荷是集中负荷,并联负荷模型适合用于表示集中负荷。等值模型如图 4 所示。图中, R_p 和 X_p 分别为负荷的等效电阻和等效电抗; P 和 Q 分别为该处母线吸收的有功和无功功率; U_p 为该处的电压值。导纳 $Y_p(h)$ 随 Q 的不同而有所不同,计算公式如下。

a. 无功功率 Q 为正时,为感性负荷,此时有:

$$Y_p(h) = \frac{P}{U_p^2} - j\frac{Q}{hU_p^2} = \frac{1}{R_p} - j\frac{1}{hX_p} \quad (3)$$

b. 无功功率 Q 为负时,为容性负荷,此时有:

$$Y_p(h) = \frac{P}{U_p^2} - jh\frac{Q}{U_p^2} = \frac{1}{R_p} - jh\frac{1}{X_p} \quad (4)$$

1.5 并联电容组

实际情况中,大容量无功补偿装置不作为负载,而是从负载中分离出来作为单独的支路进行处理。

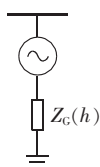


图 1 发电机等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of generator

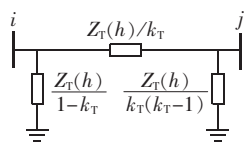


图 2 变压器 π 型等值电路

Fig.2 Equivalent pi circuit of transformer

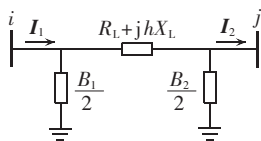


图 3 输电线路模型

Fig.3 Transmission line model

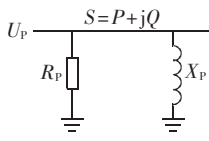


图 4 负荷模型

Fig.4 Load model

已知额定容量为 Q_c , 额定电压为 U_c 时,有:

$$X_c = \frac{U_c^2}{hQ_c} \quad (5)$$

其中, X_c 为容性电抗; Q_c 单位为 Mvar; U_c 单位为 kV。

2 基于半动态-遗传算法的节点编号优化

2.1 半动态-遗传算法

在对网络节点进行编号优化时,半动态法以其简单易行、效果良好而得到广泛应用,但存在局部寻优、搜索方式单一等固有缺陷。遗传算法具有随机搜索、全局最优的优点^[21]。本文将这 2 种方法结合,针对电力系统节点编号的特点,综合 2 种算法的优点,用于编号优化。其在优化效果上优于半动态法,在运行时间上优于遗传算法。

半动态-遗传算法的具体实现步骤如下:

a. 因为消去出线度为 1 的节点不产生非零注入元,首先用半动态法消去出线度为 1 的节点;

b. 在步骤 a 执行完毕后,节点之间连接关系发生变化,更新连线矩阵,若仍存在出线度为 1 的节点,继续执行步骤 a,否则执行步骤 c;

c. 在步骤 a、b 执行完后,剩余的节点出线度均大于 1,用遗传算法对出线度最少的所有节点进行选择、交叉、变异操作,得到最优编号;

d. 重复执行步骤 a、b、c,直到所有节点均被消去。

半动态-遗传算法流程图如图 5 所示。

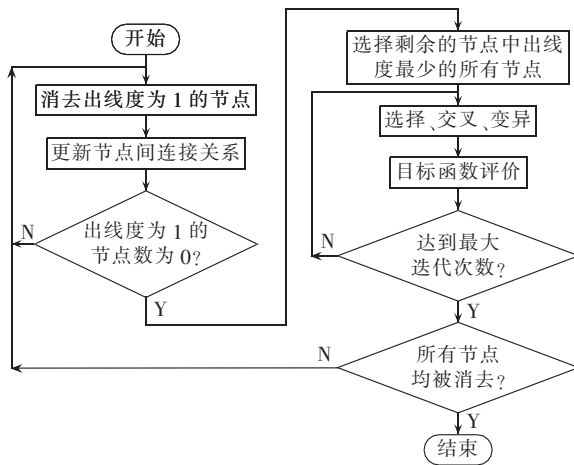


图 5 半动态-遗传算法流程图

Fig.5 Flowchart of semi-dynamic genetic algorithm

2.2 优化目标函数

假设在节点消去的过程中,直接与节点 k 相连的节点数为 N_k ,这 N_k 个节点之间已经有 D_k 条支路。当节点 k 被消去时,增加的支路数,即新引入的非零元素数 Δb_k 为:

$$\Delta b_k = \frac{1}{2} N_k(N_k - 1) - D_k \quad (6)$$

若网络有 n 个节点,则编号优化目标函数为:

$$\min F = \sum_{k=1}^n \Delta b_k = \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{2} N_k(N_k-1) - D_k \right] \quad (7)$$

其中,每个节点的 N_k 和 D_k 将随着附近节点的消去而变化,应及时更新。

为此,本文程序采用连线矩阵 M ,其结构见式(8)。

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \\ 2 & 5 & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p & q & s \end{bmatrix} \quad (8)$$

连线矩阵表示节点之间的连接关系,一共有 3 列,前 2 列表示节点编号,第 3 列表示这 2 个节点所在的支路编号。例如式(8)第 1 行表示节点 1 和 2 相连,支路编号为 1;最后 1 行表示节点 p 和 q 相连,支路编号为 s 。

3 导纳矩阵的形成及求解

3.1 改进的节点法

上文介绍的连线矩阵 M 包含了系统的支路连接信息,故用节点法形成导纳矩阵时,利用矩阵 M 改进传统节点法的操作,以提高程序的运行效率。

在形成 M 时,本文的改进方法是:依次扫描 BPA 数据中对称线路(LN)、不对称线路(EN)和变压器(T),设其数量分别为 n_L 、 n_E 和 n_T ,则连线矩阵第 3 列的支路编号 1— n_L 表示连接两节点的是 LN,编号 n_L+1 — n_L+n_E 表示 EN,编号 n_L+n_E+1 — $n_L+n_E+n_T$ 表示 T。根据 M 第 3 列可确定各节点所连支路类型,从而形成该节点的互导纳和部分自导纳,再扫描该节点连接的发电机、负荷等接地元件,即得到剩余部分自导纳值。形成每个节点导纳的流程图见图 6。

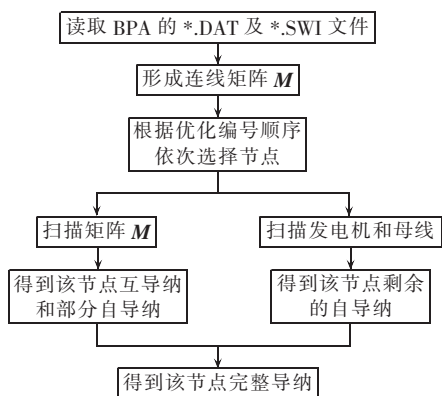


图 6 节点导纳矩阵形成流程图

Fig.6 Flowchart of node admittance matrix formation

根据优化编号后的节点顺序,依次得到每个节点的导纳,最终得到整个系统的导纳矩阵。

在谐波阻抗等值计算中,往往还要考虑不同运行方式下的等值情况。例如,切除某电力线路或变压器。由于改变一个元件的参数或它的投入、退出只影响该支路两端节点的自导纳和它们之间的互导纳,可不必重新形成与新运行状况相对应的节点导纳矩阵,仅需对原有的矩阵作某些修改。

切除一条导纳为 y_{ij} 的支路相当于增加一条导纳为 $-y_{ij}$ 的支路,与节点 i 、 j 有关的元素作如下修改:

$$\Delta Y_{ii} = -y_{ij}, \Delta Y_{jj} = -y_{ij}, \Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = y_{ij} \quad (9)$$

至此,得到 $N-0$ 、 $N-1$ 及 $N-2$ 方式下系统的导纳矩阵,可以计算在这 3 种方式下的等值阻抗。

3.2 LU 分解及前代回代

对于一个 n 阶方阵,将 $Y=LU$ 展开为:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ \vdots & \ddots & \\ l_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1n} \\ & \ddots & \\ & & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于导纳矩阵 Y 是一个对称矩阵,得到其上三角部分数据即可得到整个导纳矩阵数据。在本程序中, Y 是逐行形成的且只求取其上三角部分数据,同时逐行进行分解。假设导纳矩阵第 i 行元素为 $Y_i = [0 \ 0 \ \cdots \ y_i \ y_{i+1} \ \cdots \ y_n]$,上三角矩阵的第 i 行为 $U_i = [0 \ 0 \ \cdots \ u_i \ u_{i+1} \ \cdots \ u_n]$,下三角矩阵的第 i 列为 $L_i = [0 \ 0 \ \cdots \ 1 \ l_{i+1} \ \cdots \ l_n]^T$ 。采用的 LU 分解公式如下:

$$\begin{cases} u_j = y_j - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} u_{kj} \\ l_j = \frac{y_j - u_j}{u_i} \end{cases} \quad j = i, i+1, \cdots, n \quad (11)$$

其中, y_j 、 u_j 对应矩阵 Y 和矩阵 U 第 i 行的第 j 个元素; l_j 对应矩阵 L 第 i 列的第 j 个元素。

节点电压方程 $YV=I$ 的矩阵形式如下所示:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

将 Y 进行 LU 分解后,矩阵方程 $YV=I$ 转化为 $LUV=I$,令 $UV=X$,有 $LX=I$ 。求解网络节点方程分为 2 步:前代,求解 $LX=I$,计算出 X ;回代,求解 $UV=X$,得到需要的 V 。

交流系统谐波阻抗计算流程图如图 7 所示。

4 IEEE 9 节点系统算例

以标准 IEEE 9 节点电力系统为算例,利用电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD 的谐波分析功能对本文方法进行验证。

IEEE 9 节点系统 PSCAD 仿真示意图如图 8 所

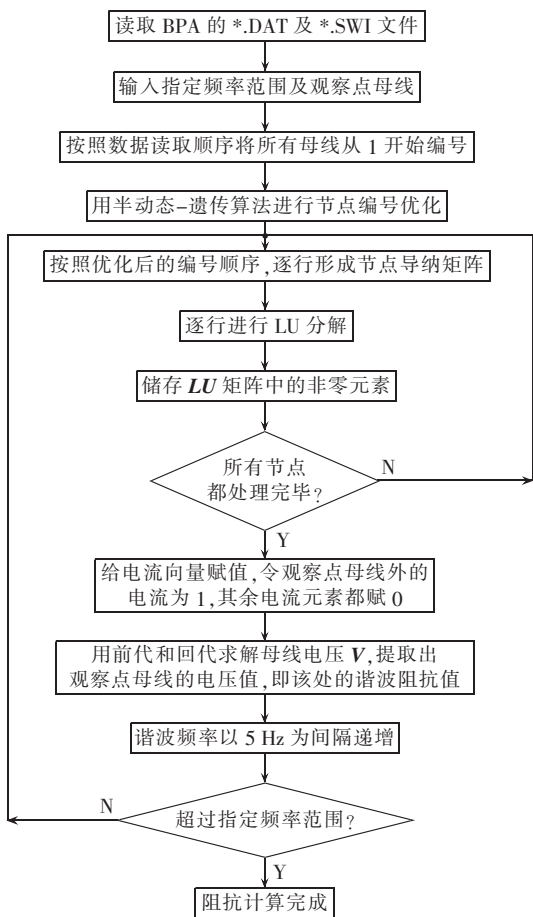


图 7 谐波阻抗计算流程图
Fig.7 Flowchart of harmonic impedance calculation

示。图中,发电机、变压器均采用 PSCAD 简化模型,输电线路采用 π 型电路, S_1 — S_4 为 4 个母线负荷,采用 Fixed Load 模型, Q_{C1} — Q_{C3} 实现无功补偿的功能。在无直流输电的情况下,利用 PSCAD 中的 $Z(f)$ 工具可以方便地对系统进行谐波阻抗扫描,扫描范围设置为 50~2500 Hz。

利用本文提出的半动态-遗传算法对系统进行节点编号优化,可快速得到最优编号方案,在此仅在表 1 中列出 3 种最优方案。分析结果可以看出,完成最优编号最少要注入 3 个非零元素。

表 1 IEEE 9 节点系统编号优化
Table 1 Optimal node numbering schemes of IEEE 9-bus system

原始编号	优化编号	原始编号	优化编号
1	1,1,1	6	4,4,8
2	5,5,5	7	6,2,6
3	9,9,9	8	7,7,3
4	2,6,2	9	8,3,4
5	3,8,7		

选择 BUS_2 作为观察点,扫描 1~50 次谐波下的阻抗。2 种方法的计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,本文方法计算得到的 IEEE 9 节点阻抗值和用 PSCAD 仿真得到的节点阻抗值偏差很小,验证了本文方法的正确性和有效性。

从以上分析可知,PSCAD 的谐波扫描工具使用方便,对节点数较小的系统可以进行精确的仿真,然

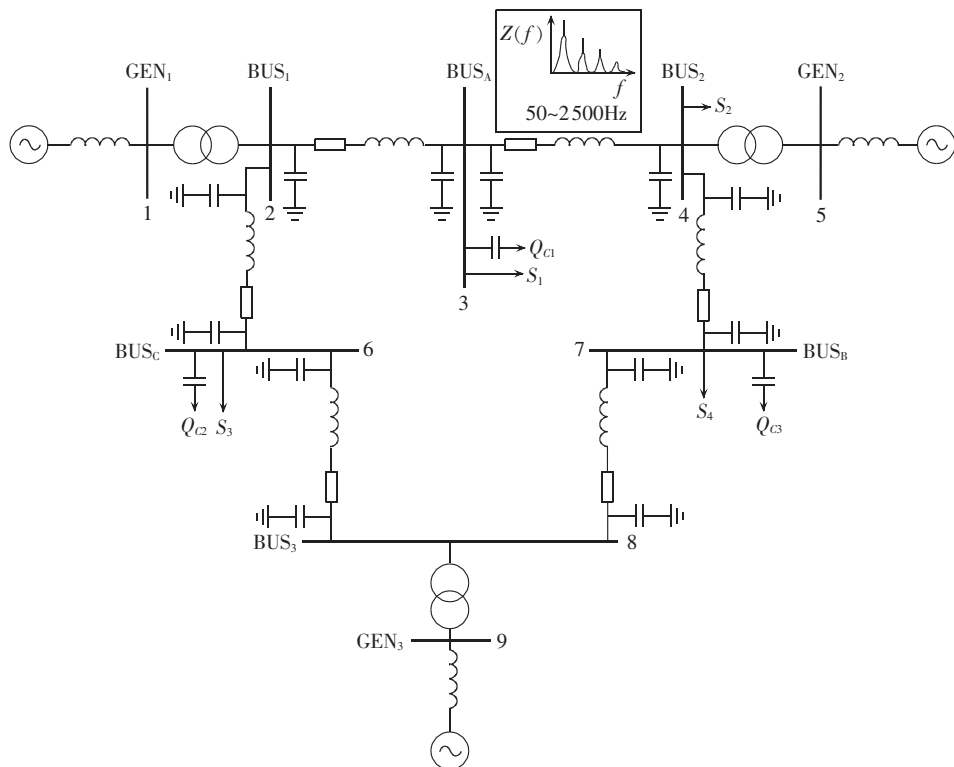


图 8 IEEE 9 节点系统
Fig.8 IEEE 9-bus system

表 2 本文方法计算结果与 PSACD 仿真结果对比
Table 2 Comparison of calculative results
between proposed method and
PSACD simulation

谐波 次数	本文方法计算结果/ Ω		PSCAD 仿真结果/ Ω	
	R	X	R	X
1	7.0608	43.2601	7.0840	43.3181
2	27.5827	88.2457	27.7631	88.3086
3	77.2726	120.9061	77.6375	120.5745
4	127.8249	99.2838	127.3630	98.6180
5	122.9512	75.8099	122.2873	76.0853
6	119.4181	82.7583	119.4228	83.2445
7	121.0352	84.8818	121.2559	84.9623
8	108.8867	94.0149	108.9485	93.9505
9	95.0116	125.6788	95.0032	125.6236
10	94.1345	179.3284	94.1028	179.2683
11	114.7443	255.6609	114.6775	255.5652
12	186.0736	373.1555	185.8558	372.9755
13	547.5044	352.7880	547.1763	353.8235
14	354.3612	320.7237	354.2290	320.6915
15	630.9224	464.3065	630.6364	464.4709
16	1097.5639	204.9753	1097.4620	205.5508
17	1043.9868	-444.2447	1044.4207	-443.9631
18	623.1197	-648.3741	623.3484	-648.4464
19	363.1934	-596.7755	363.1545	-596.7901
20	229.3368	-510.4501	229.3426	-509.0563
21	166.1594	-448.7015	165.9908	-448.8258
22	120.8649	-394.8075	120.8874	-394.8627
23	93.0183	-352.3918	93.0437	-352.4380
24	74.2859	-318.6183	74.3054	-318.6566
25	61.0027	-291.1833	61.0174	-291.2150
26	51.2016	-268.4776	51.2130	-268.5035
27	43.7373	-249.3722	43.7461	-249.3941
28	37.9033	-233.0642	37.9102	-233.0830
29	33.2436	-218.9700	33.2493	-218.9858
30	29.4537	-206.6554	29.4584	-206.6692
31	26.3228	-195.7940	26.3266	-195.8060
32	23.7012	-186.1339	23.7044	-186.1447
33	21.4802	-177.4800	21.4830	-177.4892
34	19.5792	-169.6757	19.5816	-169.6839
35	17.9372	-162.5971	17.9393	-162.6044
36	16.5074	-156.1428	16.5092	-156.1496
37	15.2534	-150.2307	15.2549	-150.2368
38	14.1463	-144.7921	14.1476	-144.7973
39	13.1631	-139.7692	13.1643	-139.7740
40	12.2853	-135.1140	12.2864	-135.1185
41	11.4978	-130.7863	11.4988	-130.7902
42	10.7881	-126.7500	10.7890	-126.7540
43	10.1459	-122.9766	10.1467	-122.9799
44	9.5626	-119.4387	9.5633	-119.4421
45	9.0309	-116.1150	9.0315	-116.1180
46	8.5447	-112.9849	8.5453	-112.9879
47	8.0987	-110.0320	8.0992	-110.0345
48	7.6884	-107.2405	7.6891	-107.2426
49	7.3102	-104.5965	7.3106	-104.5988
50	6.9604	-102.0885	6.9608	-102.0909

而当系统较大时,手动搭建模型不仅工作量大而且可能出现人为误差^[22]。本文提出的数值计算方法,以已有的 BPA 数据为依托,不必搭建庞大的模型,且在计算速度上要优于仿真。

5 湖南长沙特高压直流工程计算结果

以湖南长沙特高压直流输电工程 2015 年度基本潮流数据为依托,对丰大、丰小、枯大、枯小 4 种运行方式, $N-0$ 、 $N-1$ 、 $N-2$ 3 种线路开断方式分别进行了计算。该工程在丰大时有 537 条母线、102 台发电机、241 台变压器、82 条不对称线路、575 条对称线路。以换流站为中心的直流输电系统拓扑结构如图 9 所示。

图 9 中,虚线框内为直流输电部分,包括换流站和直流输电线路;左右两端交流系统各用戴维南电路等效为一个带阻抗的发电机。选择第一个出线母线为观察点,即图中的母线 JQDC。

5.1 节点编号优化结果比较

计算机硬件配置为 Pentium G2030,CPU 主频 3.0 Hz,内存 2 GB,操作系统 Windows 7,仿真环境 VC6.0。分别用静态法、半动态法、遗传算法、半动态-遗传算法对该工程进行编号优化,比较其新增支路数及完成编号所用时间,结果如表 3 所示。

表 3 不同优化算法所用时间对比
Table 3 Comparison of calculation time
among different optimization algorithms

优化编号方法	新增支路数	编号优化用时/s
不用编号优化	1653	0
静态法	742	0.009
遗传算法	343	10.592
半动态法	323	0.116
半动态-遗传算法	311	1.107

由优化结果可以看出,遗传算法的新增支路数适中,用时较长;半动态法的新增支路数不是最优;半动态-遗传学算法新增支路数最少,用时介于半动态法和遗传算法之间。对于同一个系统,节点编号只需一次,下次计算可直接调用,故这里对编号优化用时不做严格要求。

对该工程深入分析发现,537 条母线中,出线度为 1 的母线有 238 条,占总母线数的 44.3%。将这类节点用半动态法消灭,可以极大减轻编号优化的工作量。

5.2 不同运行方式下阻抗计算结果

对湖南地区的丰大、丰小、枯大、枯小 4 种运行方式,在 $N-0$ 、 $N-1$ 、 $N-2$ 下的工况进行计算分析,选择母线 JQDC 为观察点, $N-1$ 断开母线 JQDC 与 X03xtG 所连线路, $N-2$ 在 $N-1$ 的基础上断开母线 JQDC 与 X02zznG 所连线路。频率范围为 50~2 500 Hz,扫描步长为 5 Hz,限于篇幅,本文只给出丰大方式下的计算结果。

丰大 $N-0$ 方式下的阻抗图与幅频特性图分别如图 10 和图 11 所示。

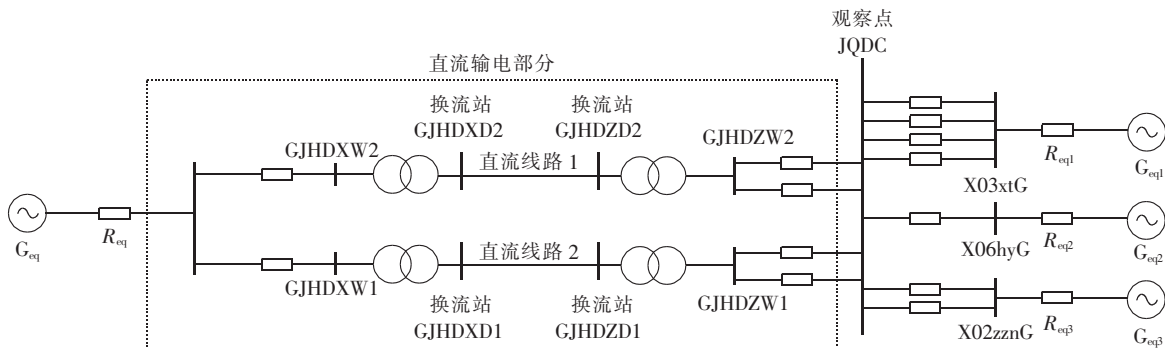


图 9 直流输电系统拓扑结构图
Fig.9 Topology of HVDC system

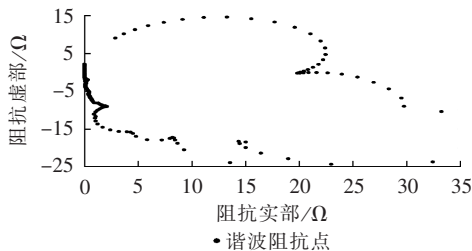


图 10 丰大 $N-0$ 方式下的阻抗图
Fig.10 Impedance diagram in flood season large power flow mode of $N-0$ pattern

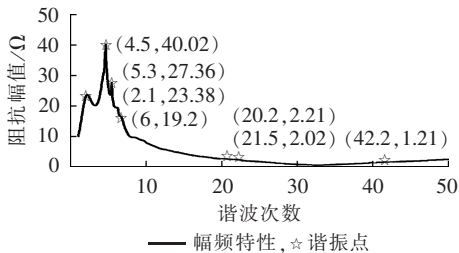


图 11 丰大 $N-0$ 方式下的幅频特性图
Fig.11 Impedance-frequency chart in flood season large power flow mode of $N-0$ pattern

丰大 $N-1$ 方式下(断 JQDC 与 X03xtG 所连线路)的阻抗图与幅频特性图分别如图 12 和图 13 所示。

丰大 $N-2$ 方式下(断 JQDC 与 X03xtG 所连线路及 JQDC 与 X02zznG 所连线路)的阻抗图与幅频特性图分别如图 14 和图 15 所示。

由以上阻抗图及幅频特性图可以得到在 JQDC 处,不同的运行方式下阻抗的分布情况及可能发生

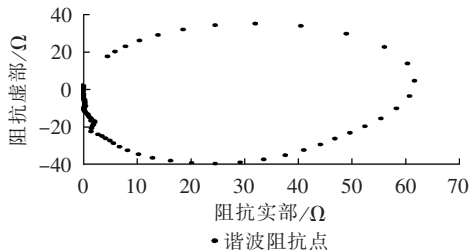


图 12 丰大 $N-1$ 方式下的阻抗图
Fig.12 Impedance diagram in flood season large power flow mode of $N-1$ pattern

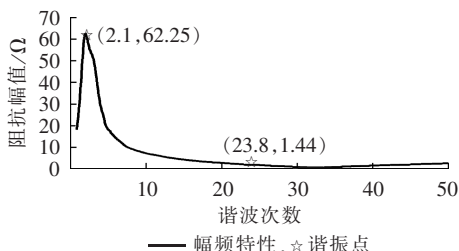


图 13 丰大 $N-1$ 方式下的幅频特性图
Fig.13 Impedance-frequency chart in flood season large power flow mode of $N-1$ pattern

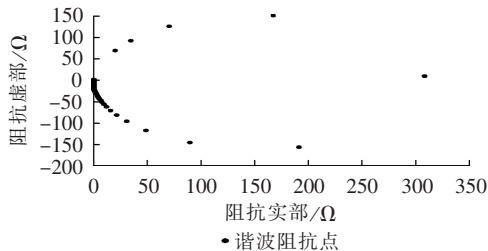


图 14 丰大 $N-2$ 方式下的阻抗图
Fig.14 Impedance diagram in flood season large power flow mode of $N-2$ pattern

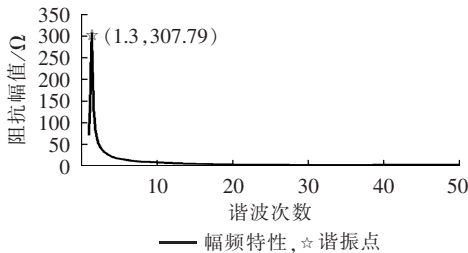


图 15 丰大 $N-2$ 方式下的幅频特性图
Fig.15 Impedance-frequency chart in flood season large power flow mode of $N-2$ pattern

的谐振点,从而为 JQDC 节点处的滤波器参数设计提供了依据。

5.3 考虑某一特定频次下的阻抗结果

为了考虑某一节点的某一特定频次作为直流工程滤波器调谐点和参数设计的输入条件,需要得到所有运行方式下该频次的阻抗值。由 5.2 节的结

果可以看出,在 3 次谐波附近容易发生谐振,对电网危害极大。选择母线 JQDC 为观察点,计算丰大、丰小、枯大、枯小分别在 $N=0$ 、 $N=1$ 、 $N=2$ 运行方式下 3 次谐波及其 ± 20 Hz 范围内的阻抗值,得到其扇形包络图如图 16 所示。

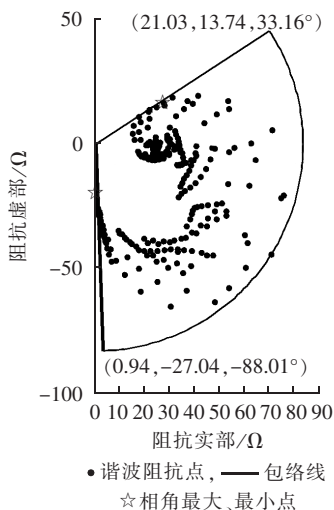


图 16 3 次谐波在所有方式下扇形包络图

Fig.16 Fan-shaped envelope diagram for third harmonic in all modes

由图 16 得到,阻抗值的最小相角为 -88.01° ,最大相角为 33.16° ,同时得到最大、最小相角对应的阻抗值。从而得到母线 JQDC 处 3 次谐波作为直流工程滤波器调谐点和参数设计的输入条件。

6 结论

本文提出了基于中国版 BPA 数据的电力系统谐波阻抗等值计算方法,通过 PSCAD 验证了本文方法的正确性。采用本文方法对湖南长沙特高压直流工程的谐波阻抗进行了等值计算,得到了在换流站(JQDC)处作为直流工程滤波器调谐点和参数设计的输入条件,为 JQDC 节点处的滤波器参数设计提供了依据。该方法具有普适性,弥补了现有谐波阻抗等值程序的不足,能满足现代电力系统谐波阻抗等值计算要求。

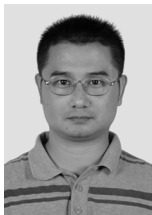
参考文献:

- [1] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ± 800 kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术,2006,30(1):1-8.
- SHU Yinbiao,LIU Zehong,GAO Liying,et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology,2006,30(1):1-8.
- [2] 邓旭,王东举,沈扬,等. ± 1100 kV 特高压换流站直流操作过电压研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):141-147.
- DENG Xu,WANG Dongju,SHEN Yang,et al. DC switching overvoltage of ± 1100 kV UHVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):141-147.

- [3] 马为民,聂定珍,曹燕明. 向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流工程中的关键技术[J]. 电网技术,2007,31(11):1-5.
- MA Weimin,NIE Dingzhen,CAO Yanming. Key technical schemes for ± 800 kV UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology,2007,31(11):1-5.
- [4] 郭贤珊,马为民. 向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流示范工程的低频谐振分析[J]. 电网技术,2008,32(10):1-10.
- GUO Xianshan,MA Weimin. Analysis on low frequency resonance in ± 800 kV UHVDC demonstration project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology,2008,32(10):1-10.
- [5] 邓旭,王东举,沈扬,等. ± 1100 kV 准东—四川特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):133-140.
- DENG Xu,WANG Dongju,SHEN Yang,et al. Main circuit parameter design of Zhundong-Sichuan ± 1100 kV UHVDC power transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):133-140.
- [6] 杨志栋,李亚男,殷威扬,等. ± 800 kV 向家坝—上海特高压直流输电工程谐波阻抗等值研究[J]. 电网技术,2007,31(18):1-4.
- YANG Zhidong,LI Yanan,YIN Weiyang,et al. Study on harmonic impedance equivalents used for AC filter design of ± 800 kV UHVDC transmission project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology,2007,31(18):1-4.
- [7] 王钢,李志镔,李海峰,等. HVDC 换流器等值谐波阻抗的计算方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):64-68.
- WANG Gang,LI Zhikeng,LI Haifeng,et al. Calculation method of harmonic equivalent impedances of HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(19):64-68.
- [8] 马玉龙,肖湘宁,姜旭,等. HVDC 换流器的阻抗频率特性[J]. 电力系统自动化,2006,30(12):66-69.
- MA Yulong,XIAO Xiangning,JIANG Xu,et al. Study on impedance-frequency characteristic on HVDC converters[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(12):66-69.
- [9] 段慧. 交流系统谐波阻抗等值与背景谐波分析[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- DUAN Hui. The AC system harmonic impedance equivalence and background harmonic analysis[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2008.
- [10] 常浩,樊纪超. 特高压直流输电系统成套设计及其国产化[J]. 电网技术,2006,30(16):1-5.
- CHANG Hao,FAN Jichao. System design and its localization of UHVDC transmission project[J]. Power System Technology,2006,30(16):1-5.
- [11] 韩俊,徐韬,王峰,等. 电力滤波器设计软件的开发和应用[J]. 中国电力,2010,43(8):46-50.
- HAN Jun,XU Tao,WANG Feng,et al. Development and application of power filter design software[J]. Electric Power,2010,43(8):46-50.
- [12] DE OLIVEIRA A,DE OLIVEIRA J C,RESENDE J W,et al. Practical approaches for AC system harmonic impedance measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1991,6(4):1721-1726.
- [13] DENSEM T J,BODGER P S,ARRILLAGA J. Three phase transmission system modelling for harmonic penetration studies[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1984(2):310-317.
- [14] 徐晓飞,曹祥玉,姚旭,等. 一种基于 Doolittle LU 分解的线性方

- 程组并行求解方法[J]. 电子与信息学报,2010,32(8):2019-2022.
- XU Xiaofei, CAO Xiangyu, YAO Xu, et al. Parallel solving method of linear equations based on Doolittle LU decomposition [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(8):2019-2022.
- [15] 谭李师. 基于母线的节点导纳矩阵计算机生成方法[J]. 电力建设, 2008, 29(4):92-94.
- TAN Lishi. Generation method of bus node admittance matrix based on computer [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(4): 92-94.
- [16] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 华中科技大学出版社, 2002: 70-76.
- [17] 陈晨, 刘俊勇, 刘友波, 等. 一种考虑变电站内部的电力系统可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2):103-109.
- CHEN Chen, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Power system reliability analysis considering substation interior [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2):103-109.
- [18] 中国电力科学研究院. PSD-BPA 潮流程序用户手册[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007:68-85.
- [19] STEVENSON W D. Elements of power system analysis [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1982:47-84.
- [20] TINNEY W F, WARLKER J W. Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization [J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(11):1801-1809.
- [21] 罗军, 于歆杰. 基于遗传算法的稀疏节点优化编号方法[J]. 电网技术, 2006, 30(22):54-58.
- LUO Jun, YU Xinjie. Sparsity node ordering technology based on genetic algorithms [J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 54-58.
- [22] 陶华, 许津津, 邹文聪. BPA 向 PSCAD 模型转换的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8):152-156.
- TAO Hua, XU Jinjin, ZOU Wencong. Model conversion from BPA to PSCAD [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8):152-156.

作者简介:



吴方劼

吴方劼(1981—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,研究方向为直流输电及直流系统设计(**E-mail**:wufangjie@chinasperi.sgcc.com.cn);

史梦梦(1992—),女,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向为电力系统谐波阻抗等值计算(**E-mail**:958030466@qq.com);

胡志坚(1969—),男,湖北荆州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源与分布式发电(**E-mail**:zhijian_hu@163.com);

王小飞(1991—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统谐波阻抗等值计算(**E-mail**:849182668@qq.com)。

Harmonic impedance equivalent calculation based on BPA data for AC system and its application

WU Fangjie¹, SHI Mengmeng², HU Zhijian², WANG Xiaofei², CHEN Bin², TANG Peng², QIU Xiaoqi²

(1. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The harmonic impedance at the bus of converter station is a critical parameter in the filter design of HVDC transmission system for suppressing harmonics. The electric element harmonic impedance models are improved for generator, transformer, line and bus load, based on which, the method for calculating the system harmonic impedance equivalent is researched based on the BPA data of China version. A node numbering optimization method based on the semi-dynamic genetic algorithm is proposed, the connection matrix is adopted to improve the formation of node admittance matrix, and the zero-exclusive storage & operation of sparse matrix technology are used to improve the operational efficiency of program. PSCAD simulation is carried out for the standard IEEE 9-bus system to verify the correctness and effectiveness of the proposed method. Based on the BPA data, the harmonic impedance equivalent of a HVDC transmission system is calculated respectively for three switching patterns, i.e. $N-0$, $N-1$ and $N-2$, in four operating modes, i.e., flood season large power flow, flood season small power flow, dry season large power flow and dry season small power flow, by which, the impedance-frequency chart and the fan-shaped envelope diagram are obtained for the AC filter parameter design of that UHVDC transmission system.

Key words: harmonic impedance; equivalence; UHV power transmission; element impedance model; BPA data; semi-dynamic genetic algorithm