

基于深度搜索的配电网前推回代潮流计算方法

配电网潮流计算是配电网分析的基础，快速潮流计算方法对于配电网网络重构、故障分析、无功优化和状态估计等具有十分重要的意义。提出了一种基于深度搜索的配电网前推回代潮流计算方法，该方法以供电点为根节点，节点关联矩阵为输入参数对配电网无向图进行深度搜索，得到打开节点访问序列、关闭节点访问序列和节点的父节点序列。在进行潮流计算时，供电点电压为恒定值，首先假定其他节点电压为额定电压，第 k 步时，根据节点电压、关闭节点序列进行前推计算支路的末端与首端功率；第 $k+1$ 步，根据打开节点序列以及支路功率回代计算节点电压。重复第 k 、 $k+1$ 步，直至相邻两次迭代节点电压之差的无穷大范数小于某一给定的小正数为止。算例表明，提出的配电网潮流计算方法收敛速度快、鲁棒性好。

张 剑 袁晓冬/国网江苏省电力公司电力科学研究院



张 剑/工程师

关键词/Keywords

电力系统·
配电网·
潮流计算·
深度搜索·
前推回代·
支路功率·
节点关联矩阵·

配电网潮流计算是配电网分析的基础，配电网的网络重构、故障分析、无功优化和状态估计等都需要用到配电网的潮流计算数据^[1]。因此，配电网潮流计算研究得到了众多学者的重视^[2-5]。

输电网潮流计算目前常用的算法为牛顿法潮流计算和PQ分解潮流计算^[6]。文献[7]指出，在系统负荷比较重时，因雅可比矩阵病态，牛顿法的收敛性和鲁棒性一直不尽人意。如何改进并提高潮流计算的收敛性及收敛速度，特别是重负荷时病态潮流算法的收敛性，多年来一直备受学术界和工程界关注。

与输电网不同，为了减小短路电流以及便于继电保护的配合，配电网一般为辐射状运行方式，因此，传统的牛顿法潮流计算方法可以得到简化。而且配电路的电阻与电抗在同一数量级上，

一般相差不大，PQ解耦法并不适用于配电网潮流计算。

文献[8]介绍了一种基于二维链表的稀疏矩阵存储方法，并将该方法应用到潮流计算中。对大系统的潮流计算证明，与传统的潮流算法相比，采用改进二维稀疏矩阵技术的潮流算法的计算速度显著提高，特别适合大规模电力系统的潮流计算。

本文提出了一种基于深度搜索的配电网前推回代潮流计算方法，该方法以供电点为根节点、节点关联矩阵为输入参数对配电网无向图进行深度搜索，得到打开节点访问序列、关闭节点访问序列和节点的父节点序列。在进行前推回代潮流计算时，供电点电压为恒定值，首先假定其他节点电压为额定电压，第 k 步时，根据节点电压、关闭节点访问序列进行前推，计算支路的末端与首端功率；第 $k+1$ 步，根据打开节点序列以及支路功率回代计算节点电压。重复第 k 、 $k+1$ 步，直至相邻两次迭代节点电压向量之差的无穷大范数小于某一给定的小正数为止。算例表明，本文提出的潮流计算方法不需要形成节点导纳矩阵与雅可比矩阵，存储容量小，收敛速度快，鲁棒性好。

无向图深度搜索算法

1. 深度搜索算法

给定无向图 G 的初始状态是所有节点均未访问过，首先访问根节点 V （源点），将其标记为已经访问过，然后从 V 出发，搜索 V 的邻接点 W 。若 W 未曾访问

过, 则以 W 为新的源点, 继续进行深度优先遍历, 直到所有和源点 W 有相通路径的顶点 (亦称为从源点可达的顶点) 均已被访问为止。若此时仍有未访问的顶点, 则选另一个尚未访问的顶点作为新的源点重复上述过程, 直至所有顶点均已被访问为止, 详细过程如下。

设 X 是当前被访问顶点, 在对 X 做过访问标记后, 选择一条从 X 出发的未曾访问过的边 (X , Y)。若发现顶点 Y 已经访问过, 则重新选择另一条从 X 出发的未曾访问过的边, 否则沿边 (X , Y) 到达未曾访问过的 Y 。对 Y 访问并将其标记为访问过, 然后从 Y 开始搜索, 直到搜索完从 Y 开始的所有路径, 即访问完所有从 Y 可达的顶点后, 才回溯到顶点 X , 并且再选择一条从 X 出发的未曾检测到的边。重复上述过程直至从 X 出发的所有边都已检测到为止。此时, 若 X 不是源点, 则回溯到在 X 之前被访问过的顶点, 否则所有和源点有路径相通的顶点 (即从源点可达的所有顶点) 都被访问过。若 G 是连通图, 则遍历结束, 否则继续选择一个尚未被访问的顶点作为新源点, 进行搜索过程。

深度搜索的程序流程图如图1所示, 其中, Pre 为打开节点序列; $Post$ 为关闭节点序列; $Pred$ 为节点的父节点序列, 若其中第 n 位值为0, 则表示节点 n 的父节点不存在, 即节点 n 为根节点; $color$ 为标记向量; $white$ 表示节点没有被访问; $gray$ 表示节点正在被访问; $black$ 表示节点访问结束。

2. 节点关联矩阵

节点关联矩阵为一个 $N \times N$ 阶矩阵, N 为节点数。当节点 i 与节点 j 之间有一条支路时, 节点关联矩阵的第 i 行第 j 列以及第 j 行第 i 列元素为1。反之, 当节点 i 与节点 j 之间没有支路时, 节点关联矩阵的第 i 行第 j 列以及第 j 行第 i 列元素为0。辐射状供电网如图2所示。配电网节点关联矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

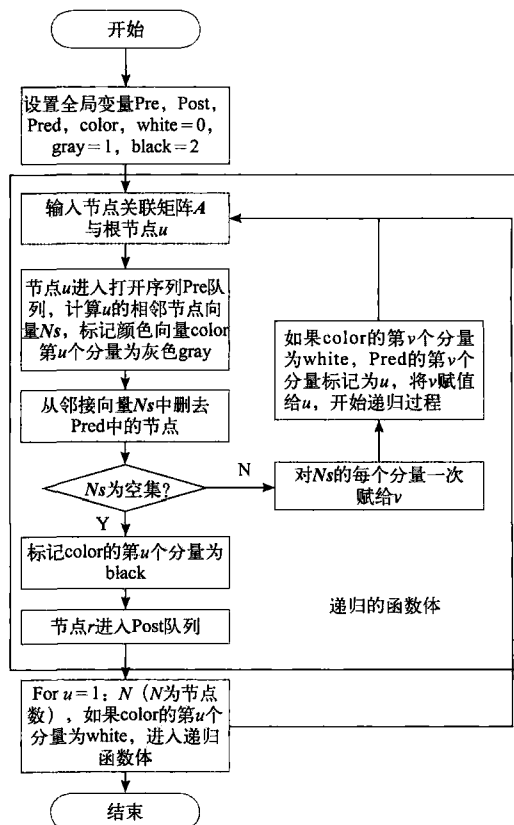


图1 深度搜索程序流程图

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

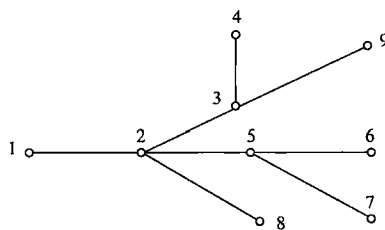


图2 辐射状供电网

前推回代算法

配电网运行时为辐射状网络, 即树状网络, 简称为树。供电点即为树的根节点, 树中不存在任何闭合回路, 功率的传送方向是完全确定的, 任一条支路都有确定的始节点和终节点。除根节点外, 树中的节点可分为叶节点和非叶节点两类。叶节点只同一条支路连接, 且为该支路的终节点。非叶节点与两条或两条以上的支路连接,

它作为一条支路的终节点，又兼做一条支路或多条支路的始节点。对于图2所示的网络，1是供电点，即根节点，节点2、3和5为非叶节点，节点4、6、7、8和9为叶节点。

配电网前推回代潮流计算时供电点的电压是已知的，计算过程如下：

1) 第一次迭代时，假定除供电点以外的其他节点电压为额定电压，根据深度搜索得到的关闭节点访问序列Post、节点的父节点序列Pred，从配电网的末端节点向首端节点前推计算得到各支路的末端功率 S_{ij}^* ，首端功率 S_{ij}' 。支路功率与电压计算方法如图3所示，支路末端功率计算公式为

$$S_{ij}^{n(k)} = S_j^{(k)} + \sum_{m \in N_j} S_{jm}^{n(k)} \quad (2)$$

式中， N_j 为以 j 为始节点的支路的终点集，若 j 为叶节点，则 N_j 为空集； k 为迭代次数； $S_j^{(k)}$ 为节点 j 的负

荷功率； $\sum_{m \in N_j} S_{jm}^{n(k)}$ 为以 j 为始节点各支路的首端功率之和。各支路的首端功率 $S_{ij}^{r(k)}$ ，计算公式为

$$S_{ij}^{r(k)} = S_{ij}^{n(k)} + \Delta S_{ij}^{(k)} \quad (3)$$

式中， $\Delta S_{ij}^{(k)}$ 为支路功率损耗，计算公式为

$$\Delta S_{ij}^{(k)} = \frac{P_{ij}^{n(k)2} + Q_{ij}^{n(k)2}}{V_j^{(k)2}} (r_{ij} + jx_{ij}) \quad (4)$$

式中， $P_{ij}^{n(k)2}$ 、 $Q_{ij}^{n(k)2}$ 分别为第 k 步支路末端有功、无功功率的二次方； r_{ij} 、 x_{ij} 分别为支路的电阻、电抗。

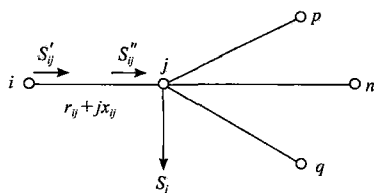


图3 支路功率与电压计算方法示意图

2) 根据首端节点的功率、电压及各支路的首端功率，按照深度搜索得到的打开节点序列Pre、节点的父节点序列Pred从首端向末端节点回代计算各节点的电压，计算公式为

$$V_j^{(k+1)} = \sqrt{\left(V_i^{(k+1)} - \frac{P_{ij}^{r(k)} r_{ij} + Q_{ij}^{r(k)} x_{ij}}{V_i^{(k+1)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{ij}^{r(k)} x_{ij} + Q_{ij}^{r(k)} r_{ij}}{V_i^{(k+1)}} \right)^2} \quad (5)$$

式中， $P_{ij}^{r(k)}$ 、 $Q_{ij}^{r(k)}$ 分别为第 k 步支路首端的有功、无功功率； $V_i^{(k+1)}$ 、 $V_j^{(k+1)}$ 为第 $k+1$ 步支路首、末端节点电压。

3) 重复步骤1)和步骤2)进行迭代，直到满足式(6)，记录此时的配电网的各节点电压、各支路的功率和损耗功率。

$$\max_i \{ |V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}| \} < \varepsilon \quad (6)$$

式中， $V_i^{(k)}$ 、 $V_i^{(k+1)}$ 分别为第 k 、 $k+1$ 步节点 i 的电压； ε 为收敛的判据，为给定容许误差，指定的小正数，可以取为0.000 1（标么值）。

前推回代潮流计算程序流程图如图4所示。

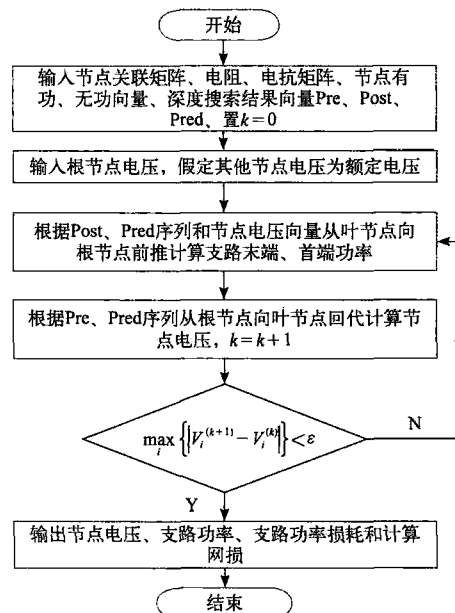


图4 前推回代潮流计算程序流程图

仿真算例

本文采用两个算例进行了试算，分别用于验证单电源供电与多电源供电情况下所提出算法的正确性与快速性，程序采用Matlab编写。

算例1：以3馈线16节点3网孔系统为例，如图5所示，线路额定电压为23 kV，图中虚线部分表示联络开关所在位置，为常开开关。

深度搜索得到的打开节点序列为 $Pre = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 16 \ 14 \ 15]$ ；关闭节点序列为 $Post = [4 \ 3 \ 5 \ 2 \ 1 \ 9 \ 10 \ 8 \ 11 \ 7 \ 6 \ 16 \ 15 \ 14 \ 13 \ 12]$ ；节点父节点序列为 $Pred = [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 0 \ 6 \ 7 \ 8 \ 8 \ 7 \ 0 \ 12]$

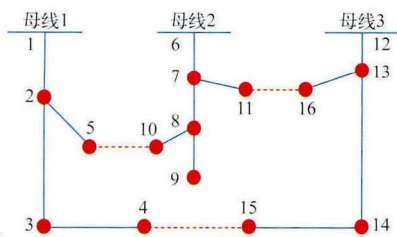


图5 IEEE典型的3馈线试验系统

13 14 13]。潮流计算节点电压标幺值如表1所示，系统总的网损为511.4 kW。

表1 16节点潮流计算节点电压

节点编号	1	2	3	4	5
电压幅值/kV	1.000	0.990 7	0.986 0	0.984 9	0.987 8
节点编号	6	7	8	9	10
电压幅值/kV	1.000	0.979 1	0.971 1	0.969 3	0.971 0
节点编号	11	12	13	14	15
电压幅值/kV	0.976 9	1.000	0.994 4	0.991 8	0.991 3
节点编号	16	—	—	—	—
电压幅值/kV	0.994 8	—	—	—	—

算例2：以美国PG&E 69节点配电系统为例，如图6所示，线路额定电压为12 kV，该系统含有69个节点，73条支路，5个网孔，其中节点1为供电点，图6中虚线部分表示联络开关所在位置。

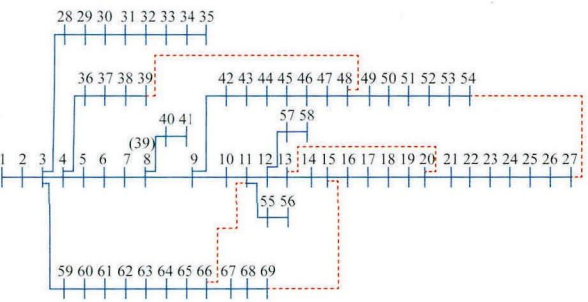


图6 美国PG&E69节点配电系统

深度搜索得到的打开节点序列为Pre=[1 2 3 28 29 30 31 32 33 34 35 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 4 36 37 38 39 5 6 7 8 9 10 11 55 56 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 57 58 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 40 41]；关闭节点序列为Post=[35 34 33 32 31 30 29 28 69 68 67 66 65 64 63 62 61 60 59 39 38 37 36 56 55 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 58 57 12 11 10

54 53 52 51 50 49 48 47 46 45 44 43 42 9 41 40 8 7 6 5 4 3 2 1]；节点的父节点序列为Pred=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 3 28 29 30 31 32 33 34 4 36 37 38 8 40 9 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 11 55 12 57 3 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68]。潮流计算节点电压标幺值如表2所示。总网损为229.5 kW，节点50、51、52、53和54的电压最低是因为该地区的无功负荷最大，导致电压损耗大。

表2 69节点潮流计算节点电压

节点编号	1	2	3	4	5
电压幅值/kV	1.000	0.999 8	0.999 7	0.999 6	0.998 6
节点编号	6	7	8	9	10
电压幅值/kV	0.988 6	0.978 2	0.975 7	0.974 5	0.968 9
节点编号	11	12	13	14	15
电压幅值/kV	0.967 6	0.964 1	0.960 8	0.957 6	0.954 3
节点编号	16	17	18	19	20
电压幅值/kV	0.953 7	0.952 8	0.952 7	0.952 2	0.951 9
节点编号	21	22	23	24	25
电压幅值/kV	0.951 4	0.951 3	0.951 3	0.951 1	0.950 9
节点编号	26	27	28	29	30
电压幅值/kV	0.950 8	0.950 8	0.999 7	0.999 6	0.999 4
节点编号	31	32	33	34	35
电压幅值/kV	0.999 4	0.999 3	0.999 0	0.998 6	0.998 6
节点编号	36	37	38	39	40
电压幅值/kV	0.999 5	0.998 1	0.993 8	0.993 2	0.975 7
节点编号	41	42	43	44	45
电压幅值/kV	0.975 7	0.974 5	0.970 8	0.965 8	0.960 9
节点编号	46	47	48	49	50
电压幅值/kV	0.935 7	0.923 2	0.918 4	0.912 8	0.904 5
节点编号	51	52	53	54	55
电压幅值/kV	0.904 2	0.904 0	0.901 9	0.901 2	0.967 5
节点编号	56	57	58	59	60
电压幅值/kV	0.967 5	0.963 7	0.963 7	0.999 7	0.999 5
节点编号	61	62	63	64	65
电压幅值/kV	0.999 3	0.999 0	0.999 0	0.998 3	0.997 9
节点编号	66	67	68	69	—
电压幅值/kV	0.997 9	0.997 9	0.997 8	0.997 8	—

本文提出的潮流计算方法与其他方法的对比结果如表3所示。由表3可以看出本文方法的优越性。

(下转第44页)

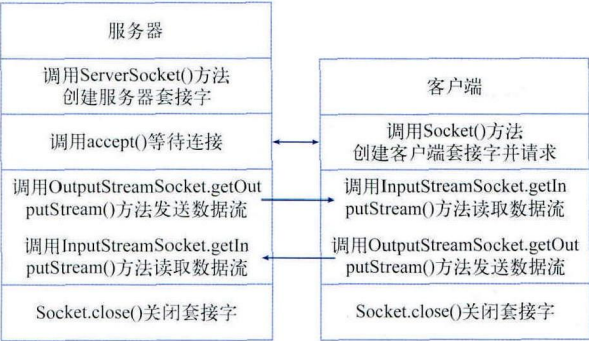


图10 TCP套接字流程

结束语

科技的进步推动了智能家居的发展和普及，本文重点研究了智能家居中的室内照明系统，设计了基于WiFi无线网络和单片机的智能室内LED照明系统，详细介绍了灯控节点、AP节点以及智能终端软件系统的设计，给出了硬件电路和软件流程。整个系统方案合理、易于实现及成本低廉，为智能家居在未来的发展提供了一条可借鉴的思路。

(上接第19页)

表3 与其他潮流计算方法的对比

潮流计算方法	牛顿法	高斯法	PQ解耦法	本文方法	
收敛代数	16节点	11	32	不收敛	3
	69节点	18	45	不收敛	3
计算时间 /s	16节点	0.8	1.7	—	0.012
	69节点	1.6	2.4	—	0.082

结束语

本文提出了一种基于配电网无向图深度搜索的潮流计算方法，该方法不要求解非线性方程组，不需要形成节点导纳矩阵，只需要进行2~3次迭代即可精确计算出配电网的潮流结果，计算量小、收敛速度快及存储空间小，优于传统牛顿法、高斯法和PQ解耦法。

参考文献

[1] 孙秋野, 张化光, 刘兆冰. 配电网模糊潮流计算方法及其收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (10) : 46-50.

参考文献

[1] 唐鹏光, 付蔚. 基于无线传感网智能家居照明控制系统研究与实现[J]. 世界电子元器件, 2012, 18 (11) : 52-55.

[2] 卢林杰, 秦会斌. 基于STM8S103和WiFi的智能家居照明系统设计[J]. 电气自动化, 2014, 36 (3) : 101-103.

[3] 邵健, 魏先巍. 基于家庭WiFi网络的DALI智能照明系统设计[J]. 通化师范学院学报, 2013, 34 (4) : 21-23.

[4] 盛仲飙. WiFi无线网络技术及安全性研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20 (16) : 1-3.

[5] 窦林平. 国内LED照明应用探讨[J]. 照明工程学报, 2011, 22 (6) : 51-58.

[6] 江燕良. 基于Android智能终端的远程控制系统[J]. 电子技术应用, 2012, 38 (8) : 129-132.

(收稿日期: 2014-09-28) EA

[2] 刘国威, 孙秋野, 张化光. 配电系统非恒功率负荷潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (16) : 22-27.

[3] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

[4] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[5] Chang G W, Chu S Y, Wang H L. An improved backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22 (2) : 882-884.

[6] 卢志刚, 程慧琳, 冯磊. 基于支路功率选取的功率扩展潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28 (6) : 208-215.

[7] 林济铿, 吴鹏, 袁龙, 等. 基于张量法的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (34) : 113-119.

[8] 朱凌志, 安宁. 基于二维链表的稀疏矩阵在潮流计算中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29 (8) : 51-55.

(收稿日期: 2014-09-10) EA