

网格化规划系统中电气计算核心算法的实现

迟福建¹, 孙阔¹, 张章¹, 张媛², 吴倩^{2*}

(1. 国网天津市电力公司, 天津市 河北区 300010;
2. 天地电研(北京)科技有限公司, 北京市 昌平区 102206)

Implementation of Core Algorithm of Electrical Calculation in Grid Planning System

CHI Fujian¹, SUN Kuo¹, ZHANG Zhang¹, ZHANG Yuan², WU Qian^{2*}

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Hebei District, Tianjin 300010, China;
2. Beijing T&D Science and Technology Corporation, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要:为解决目前国内外电气计算方法对规划电网输入参数要求过高的难题,将地块预测负荷转变成电气计算负荷,提出对地块未来负荷进行空间分配的实现方法;并在研究经典可靠性公式的基础上提出综合故障率的概念,给出了更具实用性的可靠性工程计算公式,简化了经典公式的使用条件。将电气一体化计算(含潮流、短路、可靠性及 $N-1$ 校验)、负荷预测和负荷空间分配等核心算法应用在德州晶华网格化规划项目中,结果表明,该工程化实现方法准确、快速,能满足电网规划工作的需要。

关键词: 电网规划; 负荷预测; 负荷空间分配; 潮流计算; 短路计算; 可靠性计算; $N-1$ 校验

ABSTRACT: In order to solve the problem that the current domestic and foreign electrical calculation methods have too high requirements for the input parameters of the planning power grid, the predicted load of the plot was transformed into the electrical calculation load, and the realization method of spatial distribution of the future load of the plot was proposed. On the basis of studying the classical reliability formula, the concept of comprehensive failure rate was proposed. Moreover, a more practical reliability engineering calculation formula was given, which simplifies the use conditions of the classical formula. The core algorithms of electrical integration calculation (including power flow, short circuit, reliability and $N-1$ verification), load forecasting and load space allocation algorithm were applied in the grid planning project of Dezhou Jinghua. The results show that the engineering implementation method is accurate and fast, and can meet the needs of power grid planning.

KEY WORDS: power grid planning; load forecasting; load space allocation; power flow calculation; short circuit

calculation; reliability calculation; $N-1$ check

0 引言

配电网规划、网损计算、经济调度等都离不开现状电网和规划电网的各种电气计算,包括潮流计算、短路计算、可靠性及 $N-1$ 校验等^[1]。负荷预测是各类电气计算的基础;现状电网的可靠性评估与规划电网的可靠性预测是电气计算的目的,也是实现配电网规划精准投资、精益化管理的要求,需要给出定量的计算结果。

负荷预测方法很多,目前常用的方法大致分为2类^[2]:第1类是根据历史用电负荷进行预测;第2类是根据空间负荷密度法直接预测^[3]。但目前这2类方法属于空间负荷预测,其结果不能直接用于配电网潮流计算,这是因为配电网潮流和短路计算仅能对有明确数值的电网进行计算,对于负荷集中在地块上的规划电网,算法往往对输入参数要求过高(数量多或者精度高)^[4]。目前,能直接用于规划电网电气计算、以馈线为颗粒度的电气负荷预测方法鲜见报道。

关于配电网的 $N-1$ 校验,目前主流算法是采用深度优先和广度优先的局部拓扑穷举法。这种算法需多次计算,应用起来不够方便。可靠性计算对于现状电网有体系化的成熟公式,但使用时需要较多的输入参数,且数据的获取往往需要估算,不便于工程应用。

针对上述问题,本文提出了网格化规划系统中电气计算的核心算法,并结合德州晶华网格规划项目,将核心算法运用在配电网规划软件中,其计算结果与电力系统潮流计算软件BPA计算结果的误差在8%以内,证明核心算法有效、准确。

1 负荷预测及负荷分配

1.1 负荷预测

1.1.1 近中期负荷预测

近中期负荷预测方法将负荷划分为自然负荷和大用户负荷,全口径最大负荷为自然负荷与大用户负荷之和。

大用户所组成的点负荷是构成电力负荷的重要组成部分,适用于S型曲线。本文对近中期负荷预测进行如下改进:若某些配变的负荷未知,只有容量已知,则配变的负荷大小由式(1)进行估算。

$$P_{\text{block}} = \sum_{i=1}^n p_{\text{pbi}} \times \eta_z \quad (1)$$

式中: P_{block} 代表地块负荷; p_{pbi} 代表该地块上未知负荷的第 i 台配变容量; η_z 代表该配变所在线路的综合负载率。

各地块的自然增长率按其所属网格最近3年用电的平均增长率来估算今后用电的年增长率,以此来推算规划期的用电负荷。若缺失相关数据,则用户可自行设定缺省值。

1.1.2 远景年负荷预测

采用空间负荷密度法^[4]进行远景年负荷预测。对预测区域在空间上进行分区,分为网格、单元、地块3个层级^[5]。分区划分存在着包含关系,即供电网格包含供电单元,供电单元包含地块。

应用空间负荷预测法进行预测时,首先结合市政资料确定规划区内每一地块的用地性质及占地面积,再根据确定的各项用地性质负荷指标,计算每一地块饱和负荷^[6]。各地块饱和负荷考虑同时率,逐步得到单元、网格总负荷。

当市政资料只有总体性规划时,负荷=地块占地面积×占地面积负荷密度指标;当市政资料有控制性详细规划时,负荷=地块建筑面积×建筑面积负荷密度指标×需用系数。

各类负荷指标的选取应参考各网省公司给出

的配电网网格化规划中负荷密度指标的选取原则,并结合实际数据进行类比选取。

1.2 负荷分配

本文所提出的空间负荷分配方法将未来新增地块的负荷转变成线路或变压器的电气负荷。为了体现经济性,避免因解决重载而增加投资成本,本文基于配电变压器经济运行^[7],提出以均衡负荷为目标的配电网规划负荷分配算法,包含地块原有负荷的分配和尚未明确的未来负荷的分配2种情况。均衡负荷是指经优化分配后,各主变、线路负载率相差不多,不会出现明显轻载和重载的情况。

1.2.1 地块原有负荷的分配方法

地块负荷的空间分配如图1所示。地块1的原有负荷1、2、3经开关站KG由馈线1供电,规划年新增负荷1、2计划由馈线1经开关站KG供电,但地块1上未来负荷1、2、3的供电方式未确定。

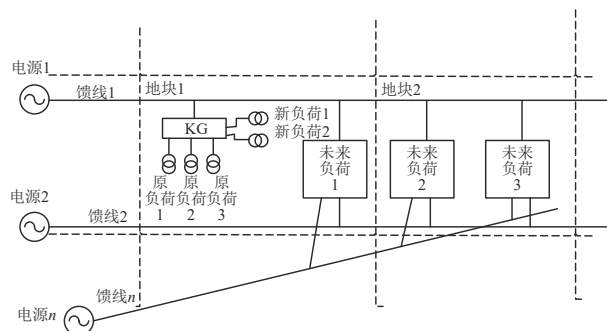


图1 地块负荷的空间分配

Fig. 1 Spatial distribution of land load

对于原负荷1、2、3,按照给定的自然增长率(如3%)预测规划年的负荷。对于新增的配电设施——接入新负荷1、2的2台配电变压器,新负荷1、2的负荷取为其所接入配电变压器的容量与配变最优平均负载率(一般取40%~50%)^[8]的乘积。

某条馈线规划年已分配负荷计算公式为

$$P_{\text{yline}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{linei}} \times (1 + r\%)^{n-1} + \sum_{j=1}^m 50\% \times S_{\text{linej}} \quad (2)$$

式中: P_{linei} 为该馈线的第 i 个原有负荷; $r\%$ 为负荷年自然增长率; S_{linej} 为新增配变 j 的容量。

1.2.2 地块未来负荷的分配方法

结合图1,假定地块1、2上分别有 n 条馈线经过,因此这2个地块上的未来负荷可以平均分

配在这 n 条馈线上。实现步骤如下:

1) 统计伸入某个地块所有馈线的已分配负荷。对于伸入此地块的每条线段, 利用拓扑关系计算其下游接入的所有配变, 根据配变经济负载率将配变容量转化为配变负荷, 作为该线路的已分配负荷, 这样就可以得到每条馈线的已分配负荷, 如式(2)所示。

2) 计算某地块所有已分配负荷。所有伸入某地块线路的已分配负荷之和记为该地块的已分配负荷, 表示为

$$P_{yblock} = \sum_{h=1}^r P_{ylineh} \quad (3)$$

式中: P_{yblock} 为该地块的已分配负荷; P_{ylineh} 为馈线 h 的已分配负荷; r 为线路的总条数。

3) 计算某地块的未分配负荷。某地块的未分配负荷计算公式为

$$P_{ublock} = P_{block} - P_{yblock} \quad (4)$$

4) 为伸入某地块的每条馈线分配地块的未分配负荷。将地块的未分配负荷分配到伸入该地块的各条线路中, 得到每条馈线的未分配负荷, 计算公式为

$$P_{ulineh} = P_{ublock} (1 - \eta P_{ylineh} / P_{yblock}) / (r - \eta) \quad (5)$$

式中: P_{ulineh} 为馈线 h 的未分配负荷; η 为所有已分配负荷线路的负载率之和。

现以图1所示地块1中未来负荷1的分配为例对式(5)进行说明。假设一共有 r 条馈线伸入地块1中, 馈线1至馈线 m 的已分配负荷分别为 $l_1, l_2, \dots, l_m$, 其余 $r-m$ 条馈线的已分配负荷均为零(为新建馈线), 地块1的总负荷为 l_0 , 则地块1的全部已分配负荷为 $l_1 + l_2 + \dots + l_m$, 则地块1的未分配负荷在馈线1中的分配为

$$P_{uline1} = [l_0 - (l_1 + \dots + l_m)] \times \frac{1 - \eta l_1 / (l_1 + \dots + l_m)}{r - \eta} \quad (6)$$

同理, 地块1的未分配负荷在馈线 m 中的分配为

$$P_{ulinem} = [l_0 - (l_1 + \dots + l_m)] \times \frac{1 - \eta l_m / (l_1 + \dots + l_m)}{r - \eta} \quad (7)$$

地块1的未分配负荷在新建馈线 $m+1$ 到 r 中的分配为

$$P_{uline(m+1)-r} = [l_0 - (l_1 + \dots + l_m)] / (r - \eta) \quad (8)$$

也就是说, 将地块1的未分配负荷平均分配到每

条新建馈线上; 而已分配负荷的馈线则在每条新建馈线分配负荷的基础上, 再在各条已分配负荷的线路之间按照自身剩余容量的比例再次进行分配。

这种分配方式考虑了各条馈线之间负荷的均衡性, 但也可能会对已有线路造成过载, 后续可通过潮流计算、可靠性校验对过载线路进行负荷的二次调整。对线路负荷进行二次调整, 就是将重过载线路的某些分支负荷改切到与其相连的联络线路上。假定线路 i 重过载, 线路 $j, k, \dots, n$ 与线路 i 通过联络开关形成联络, 线路 i 有 m 个分支, 即 $i_1, i_2, \dots, i_m$, 最优负荷转移步骤如下:

1) 首先判断线路 $j, k, \dots, n$ 的负载率, 按照负载率从小到大的顺序排序, 选取负载率最小的线路 j 为转供线路, 将线路 i 的分支 $i_1, i_2, \dots, i_m$ 改切至线路 j , 且保证改切后线路 i 和线路 j 均不过载。

2) 若线路 i 的分支 $i_1, i_2, \dots, i_m$ 改切至线路 j 后造成线路 j 重过载, 则选取负载率最小的联络线路 j 和次小的联络线路 k 共同作为转供线路, 按照负荷均衡的原则将线路 i 的分支 $i_1, i_2, \dots, i_m$ 均衡改切至线路 j 和线路 k , 且保证改切后线路 i, j, k 均不过载, 以此类推。

3) 若线路 i 存在一条超级大分支 i_1 , 将 i_1 改切至任意一联络线路上均会导致该联络线重过载, 这种情况下可以将超级大分支 i_1 分散为二级分支 $i_{11}, i_{12}, \dots, i_{1p}$, 以二级分支为单位对超级大分支 i_1 进行改切和转供。

4) 若线路 i 经合理转供后线路本身的负载率在合理范围内, 但局部分支仍存在重过载时, 则考虑线路 i 是否存在“卡脖子”现象。若有, 则将截面小的分支替换为大截面分支; 若无, 则判定该分支为超级大分支, 需要按照步骤3) 进一步进行负荷改切, 这时可以考虑将该超级大分支的二级分支改切至本线路上, 也可改切至其他满足条件的联络线路上。

2 电气一体化算法

2.1 潮流短路合并算法

配电网系统可以用拓扑和潮流完整地表示。

拓扑图是对配电网中各条馈线及其电路元件、设备连接关系的数字化描述；潮流是配网中各元件和设备对系统的响应。正常情况下的潮流情况(潮流计算)和故障情况下的潮流情况(短路计算)除需要使用拓扑图外，还需要系统数据、负荷数据以及对各类设备参数的描述数据^[9]。因此，需要数据库提供细节支撑数据，如系统电压、有功功率、功率因数，各类设备(架空线、电缆、变压器、电容器)的基本参数，以及各类设备对系统电压、电流、功率的响应方式(对电压、电流、功率因数、负荷、时间或其他因数的响应函数)。

配电网由馈线组成，每条馈线呈树状，馈线间除在根节点处通过高压输电网相连以外，没有其他电气联系，根节点处的电压主要由输电网决定。每条馈线的潮流分布由其本身的负荷及根节点处的电压决定，与其他馈线无关。因此，配电网潮流、短路电流计算可以馈线为单位，多条馈线并行计算。本文采用前推回代法进行潮流和短路电流计算。

为了配合短路电流计算和避免复杂的网络编

号，依据网络拓扑结构建立了数据结构，以便利用节点之间的关系快速进行电气计算。节点表包括本节点 ID、本节点有功、本节点无功、前一节点 ID 和后一节点 ID。线路表包括本线段 ID、本线段首端节点号、本线段末端节点号、本线段电阻和本线段电抗。以图 2 所示的 8 节点模型为例进行配电网潮流计算的说明。

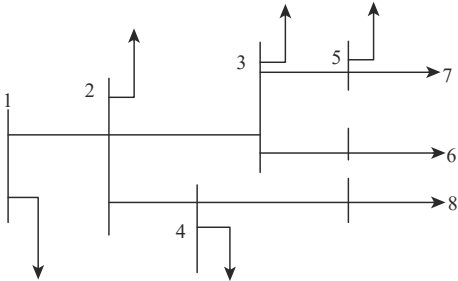


图 2 潮流计算的 8 节点算例

Fig. 2 Power flow calculation example of 8-node

潮流短路合并计算的具体实现过程如下：

- 1) 在馈线表中设置潮流拓扑和可靠性拓扑 2 个字段，从潮流拓扑字段中读取拓扑信息，生成临时节点表和临时边表，分别如表 1、2 所示；再

表 1 潮流临时节点

Tab. 1 Power flow temporary nodes

本节点 ID	总节点数	上一节点 ID	下一节点 ID	节点有功 功率/kW	节点无功 功率/(kV·A)	电流有功 分量/A	电流无功 分量/A	短路电阻/ Ω	短路电抗/ Ω	节点电压/ kV
1	1	0	2	3 170.4	746.23	316.72(3)	74.55(3)	31.60	134.27	10.01(1)
2	3	1	3, 4	2 000.7	470.92	199.87(3)	47.04(3)	50.08	212.78	10.01(4)
3	3	2	5, 6	776.3	182.72	77.71(3)	18.29(3)	128.56	546.19	9.99(4)
4	2	2	8	445.9	104.95	44.63(3)	10.51(3)	223.82	950.89	9.99(4)
5	2	3	7	301.5	70.97	30.18(3)	7.10(3)	331.01	1 406.31	9.99(4)
6	1	3	—	289.1	68.05	28.97(2)	6.82(2)	344.52	1 463.70	9.98(4)
7	1	5	—	230.9	54.35	23.14(2)	5.45(2)	431.36	1 832.63	9.98(4)
8	1	4	—	170.4	40.11	17.07(2)	4.02(2)	584.51	2 483.31	9.98(4)

注：括号内数值表示实现过程的步骤编号。

表 2 潮流临时边

Tab. 2 Power flow temporary edges

本线段编号	本线路首 端节点号	本线路末 端节点号	本线路 电阻/Ω	本线路 电抗/Ω	组成线段 lID	组成线段 nID	配电设施 lID	配电设施 nID	本线路 潮流/(kV·A)	本线路 网损/kW
12	1	2	45.20	442.96	12	—	PB11	PB1n	1 512.21	6.49
23	2	3	38.10	377.19	23	—	PB22	PB2n	848.23	3.07
24	2	4	36.70	362.23	24	—	PB44	PB4n	650.16	2.27
35	3	5	25.20	253.01	35	—	PB33	PB3n	524.54	1.26
36	3	6	35.20	354.11	36	—	PB66	PB6n	297.62	1.03
48	4	8	40.20	401.20	48	—	PB88	PB8n	175.43	0.67
57	5	7	29.40	288.12	57	—	PB77	PB7n	237.71	0.66

通过合并线段对照表和合并配电设施对照表, 提取潮流计算所需参数。

2) 对节点电压赋初值, $U_i(0)=1$, 其中 $i=1, 2, \dots, 8$ 。需要注意的是, 表1的拓扑结构是经过了一次深度优先搜索, 形成的层次关系确定了前推后代潮流算法的节点计算顺序。

3) 从最末一级负荷节点 j (在图2中, j 为节点6、7、8)开始, 根据节点 j 有功功率 P_j 和无功功率 Q_j , 计算流入该节点的支路电流:

$$I_{ij}(0) = \frac{S_j}{U_j^*(0)} = \frac{P_j + jQ_j}{U_j^*(0)} \quad (9)$$

式中: S_j 为节点 j 负荷的视在功率; $U_j^*(0)$ 为节点 j 初始电压的共轭。

4) 逐层计算非末梢节点(如节点4、5)的注入电流, 根据基尔霍夫电流定律, 应等于式(9)中计算的电流与流出的电流之和:

$$I_{iq}(q) = \frac{S_q}{U_q^*(0)} + \sum_g^m I_{ig}(0) \quad (10)$$

式中: q 为非末梢节点号; m 为节点 i 的子节点个数, 如对于节点3, 父节点 $i=2$, 子节点数 $m=2$, 子节点 g 为5、6。

根据式(9)、(10)对网络进行前向遍历, 从末节点出发, 利用已知的负荷功率逐一计算, 即可求得根节点处的电流。

步骤3)、4)在具体实施时, 通过降序排序表1, 从表尾到头查询某节点的所有连接边以及对侧节点, 累加对侧节点的电流有功分量和电流无功分量作为该节点的电流, 同时将所有连接边的下游电流设置为对侧节点的视在电流, 进行前推计算。

5) 由步骤2)、3)可求出所有支路的电流, 利用已知的根节点电压, 从根节点向后可顺次求得各个负荷节点的电压:

$$U_p(1) = U_i(1) - I_{ip}(0)Z_{ip} \quad (11)$$

式中: Z_{ip} 为父节点 i 、子节点 p 所组成支路的阻抗; $U_i(1)$ 为第1次迭代计算的 i 节点电压值; $I_{ip}(0)$ 为父节点 i 、子节点 p 之间的支路电流初始值。

6) 计算各个负荷节点的电压幅值修正量:

$$\Delta U_p(1) = |U_p(1) - U_p(0)| \quad (12)$$

7) 计算节点电压幅值修正量的最大值, 即 $\max[\Delta U_p(t)]$, 其中 t 为迭代次数。

8) 判别收敛条件:

$$\max[\Delta U_p(t)] < \varepsilon \quad (13)$$

若最大电压幅值修正量小于阈值 ε , 则跳出循环, 输出电压计算结果; 否则, 重复步骤2) — 8), 直到满足式(13)的条件为止。

9) 在得到各个节点的电压、电流后, 就可以计算线路潮流和网损, 分别表示为:

$$S_j = U_j I_{ij}^* \quad (14)$$

$$L_{sij} = |I_{ij}|^2 Z_{ij} \quad (15)$$

式中: U_j 为节点 j 的电压; I_{ij} 为支路 $i-j$ 的电流; Z_{ij} 为支路 $i-j$ 的阻抗。

10) 将表2中计算得到的电压降、损耗汇总, 可得到本条馈线的总电压降、总损耗。计算过程中, 需将表1中计算得到的电压值、最大电压降、短路电阻和电抗等写入相应表格的对应字段中。

综上, 式(9)、(10)是从末节点出发进行前向遍历, 计算各分支电流, 式(11)—(15)是从根节点出发进行后向遍历, 计算各节点电压, 这样就完成一次前推后代的计算。配电网规划中, 只需一次前推和后代过程, 结果即可满足规划精度要求。

步骤4) — 8)在具体实施时, 将电源点的短路电阻和短路电抗设置为变电站的短路电抗, 将电源点的电压设置为馈线的额定电压。通过升序排序表1, 从表头到表尾查询某节点的所有连接边以及对侧节点, 将对侧节点电压设置为该节点的电压减去其所连接边的电压降。

同时, 为了计算短路电流, 将对侧节点短路电阻、电抗设置为该节点的短路电阻、电抗及其所连接边的电阻、电抗之和。需要注意的是, 将光伏发电等新能源电源看作是负荷为负值的节点^[10-11]。通过后代计算即可得到表2中的电压降, 最后在步骤9)计算线路潮流和网损。

2.2 可靠性计算

配电网可靠性最常用的参数是预安排停电时

间和故障停电持续时间,其计算过程与潮流计算过程类似,所不同的是,潮流分析中计算的参数是系统各节点的电压和电流。

可靠性评估可以利用潮流计算模型,基于配网系统的拓扑结构,将实际配电网络转化成一个基于设备串并联的可靠性计算网络。串联设备故障率是各设备故障率的累加,任何一台设备故障都会导致整个链条停运;并联设备则存在冗余(根据容量确定),可以应对其他并联路径的停运。一般而言,并联设备是线路中设置的联络开关。

本文提出的可靠性计算利用潮流计算的表1、2,通过累加线路故障平均停电时间、线路预安排平均停电时间而得到,计算简便,在应用时,只需将式(10)中的电流换成平均停电时间即可,不再赘述。

2.3 N-1校验

N-1校验基于潮流计算结果,用以判断某条馈线或某些配变故障时能否实现负荷的转供^[12-15]。根据馈线第1段的下游转供模式能否实现,来判断馈线是否满足N-1校验。具体来说,假定馈线出口的第1段发生故障,则后续所有负荷都需要转供;找出所有联络开关,形成转供后的网络拓扑;通过对转供后网络进行潮流计算,得到该馈线出口第1段的电流。判断该电流值是否超过馈线的额定电流,若超过,则判断不满足N-1校验;否则判断为满足校验。最后,把N-1校验结果写入馈线表对应字段中。

各种电气计算结束后,将各类计算的结果用Excel表格的形式输出。计算结果可分供电单元、供电网格小计,也可全网合计,还可标注重过载线路和低电压线路。

2.4 中压馈线可靠性计算

2.4.1 现状电网中压馈线可靠性估算

本文采用的可靠性指标是年平均故障停电时间和年平均预安排停电时间。假定每户用电平均负荷为1 kW,且忽略双电源的因素,考虑配电自动化安装情况,配电自动化排查故障时间为零,则可得到每条馈线年平均故障停电时间:

$$T_{\text{if}} = \frac{L_{\text{al}} f_{\text{if}} [(1 - k_p \%) t_c + A_{\text{if}} t_R]}{100} \quad (16)$$

式中: L_{al} 为馈线总长度, km; f_{if} 为每年每百千米馈线内所有开关、配变等设备的综合故障次数; $k_p \%$ 为配变自动化安装率; $1 - k_p \%$ 定义为故障排查系数; t_c 为故障人工平均排查时间, h; t_R 为故障平均修复时间, h; A_{if} 定义为故障修复系数, 计算公式为

$$A_{\text{if}} = \frac{\sum_{j=0}^n P_{i,j} f_{i,j}}{P_i} \quad (17)$$

式中: $P_{i,j}$ 为第 i 条馈线第 j 段故障情况下本段及下游不可转供负荷之和; P_i 为馈线 i 的总负荷; $f_{i,j}$ 为第 i 条馈线第 j 段的故障率。

该馈线 i 的年平均预安排停电时间表示为

$$T_{\text{ip}} = \frac{L_{\text{al}} f_{\text{ip}} B_{\text{ip}} t_{\text{pR}}}{100} \quad (18)$$

式中: f_{ip} 为该馈线的故障率; B_{ip} 为该馈线的年平均预安排停电转供系数, 不考虑开关操作是自动操作还是人工操作时, B_{ip} 应与 A_{if} 在数值上相等; t_{pR} 为预安排故障修复时间。

现状电网的 A_{if} 和 B_{ip} 主要与网架结构有关, 可以通过可靠性拓扑计算得到。

2.4.2 规划电网中压馈线可靠性预测

可靠性预测具体流程如下:

1) 根据现状电网的可靠性网络拓扑结构, 求得现状电网的故障修复系数 A_{if} 或预安排停电转供系数 B_{ip} 。

2) 将现状电网馈线的实际年平均预安排停电时间 $T_{\text{ip}0}$ (下标 0 代表现状年, 下同)、实际馈线平均长度 $L_{\text{al}0}$ 、实际馈线平均故障率 $f_{\text{if}0}$ 和 $B_{\text{ip}0}$ 代入式(18), 可计算得到现状年预安排停电修复时间 $t_{\text{pR}0}$ 。由于各年预安排停电修复时间变化不大, 可将 $t_{\text{pR}0}$ 作为未来规划电网的年预安排停电修复时间 t_{pR} 。

3) 根据规划年电网的可靠性网络拓扑结构, 计算得到规划年电网的预安排停电转供系数 B_{ip} , 代入式(18), 可计算出规划年预安排平均停电时间 T_{ip} 。

4) 根据现状电网的可靠性网络拓扑结构, 求得现状年故障平均停电转供系数 $A_{\text{if}0}$; 假定故障修

复时间 t_R 与预安排故障修复时间 t_{PR} 相等, 将现状电网的实际年平均故障停电时间 T_{10} 、实际馈线平均长度 L_{a10} 、实际馈线平均故障率 f_{10} 、第(2)步中求得的年平均故障修复时间 t_R 、配电自动化安装率 $k_p\%$ 代入式(16), 可计算得到现状年故障排查实际时间 t_{c0} 。由于各年平均故障排查时间变化不大, 可将现状年平均故障排查时间 t_{c0} 作为未来规划年平均故障排查时间 t_c 。

5) 根据 t_R 、 t_c , 按照式(16)和(18)计算规划年各年单条线路的年平均故障停电时间和年平均预安排停电时间, 即可得到中压配电系统可靠性指标。

综上, 可靠性指标的计算只需要已知架空线路和电缆线路的预安排停电次数(概率)、故障停电次数(概率), 再结合网架结构就可以进行可靠性评估与预测。需要注意的是, 开关和配变的预安排停电概率和故障停电概率已经折算到其所在的线路上。

架空和电缆线路故障停电次数(概率)的确定原则如下: 对于网架结构提升类项目, 其可靠性的提升体现在网架结构的改善上, 意味着可靠性拓扑计算中 A_{ir} 值的降低, 可根据规划电网可靠性

拓扑图求得; 对于设备改造类项目, 其可靠性的提升体现在设备故障率的降低上, 意味着可靠性拓扑计算中 f_{ir} 值的降低。高故障率设备的改造项目在计算改造后的可靠性指标时, 应适当调低设备的故障概率。

架空和电缆线路预安排停电次数(概率)的确定原则如下: 预安排停电概率的预测应该根据综合停电管理、不停电作业计划和规程进行综合确定。

3 算例分析

以德州晶华网络为例, 选取2020年网格内所有10 kV中压线路进行潮流、可靠性计算, 并进行N-1校验, 计算结果如图3所示。各条线路的计算结果如表3所示。

对国网德州供电公司城市电网规划河东区晶华网络2020年10 kV规划电网进行电气计算, 整个网格包含23条馈线(其中3条为区外线路), 计算用时仅1.8 s。将本文的电气计算结果与电力系统潮流计算软件BPA计算结果进行对比, 二者误差在8%以内, 符合工程要求, 这表明本文提出的算法具有准确性、快速性和合理性。

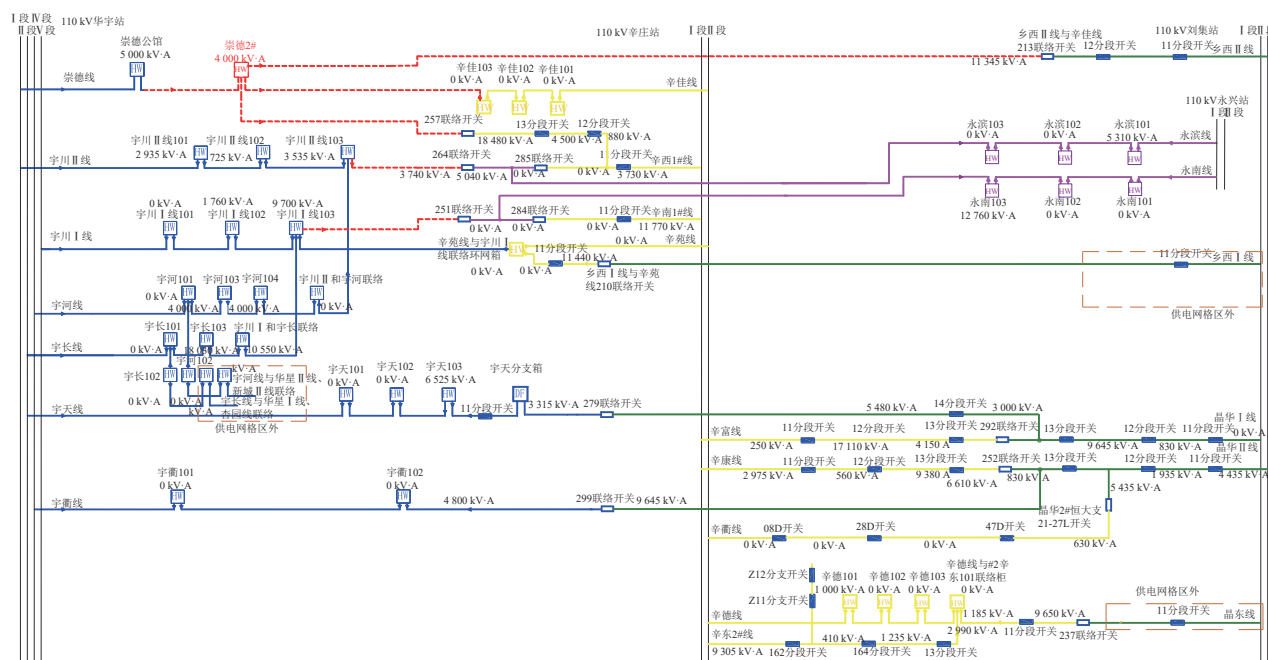


图3 晶华网络10 kV馈线电气一体化计算结果

Fig. 3 Electrical integration calculation results of 10 kV lines of JingHua network

表3 线路计算结果

Tab. 3 Line calculation results

线路名称	供电半径/ km	最低电压/ kV	线损/kW	单位负荷平均故 障排除时间/h	单位负荷平均故 障修复时间/h	单位负荷平均预 安排停电时间/h	馈线负荷/ kW	馈线容量/ (kV·A)	N-1 校验
永滨线	7.138	9.90	0.28	0.010	0.003 77	0.817	2 377.1	8 990	是
永南线	4.35	9.99	0.39	0.009	0.002 56	0.825	4 073.55	9 350	是
辛苑线	2.9	9.97	0.19	0.008 9	0.004 16	0.801	2 552.3	8 290	是
辛佳线	4.5	9.97	0.31	0.009	0.003 76	0.809	4 339.5	11 870	是
辛西 1#线	4.6	9.98	0.42	0.009	0.004 10	0.812	7 147	19 930	是
辛南 1#线	2.8	9.98	0.30	0.009	0.003 81	0.827	2 537	11 435	是
辛富线	2.8	9.97	0.40	0.009	0.003 56	0.903	7 839	18 240	是
辛康线	2.8	9.97	0.37	0.009	0.002 90	0.846	6 971	17 960	是
辛东 2#线	2.8	9.98	0.20	0.009	0.002 86	0.815	3 179.3	12 045	是
辛德线	4.5	9.99	0.25	0.009	0.002 67	0.877	3 040.6	11 875	是
辛衢线	4.45	—	—	—	—	—	0	630	是
崇德线	2.3	—	—	—	—	—	0	8 000	否
宇川 I 线	2.3	9.97	0.09	0.008 9	0.003 15	0.872	1 780	11 460	是
宇川 II 线	2.108	9.99	0.14	0.008 9	0.003 62	0.859	841.68	6 880	是
宇长线	2.1	10.02	0.42	0.008 9	0.002 88	0.863	12 617	28 580	是
宇河线	2.3	9.98	0.04	0.008 9	0.004 00	0.839	190	8 000	是
宇天线	2.9	9.99	0.38	0.010	0.003 81	0.849	2 233.8	9 840	是
宇衢线	2.6	9.99	0.05	0.010	0.003 09	0.828	321	4 800	是
宇乡 I 线	2.054	10.00	0.21	0.009	0.002 96	0.881	3 370.1	16 225	是
宇乡 II 线	1.478	9.99	0.11	0.009	0.003 41	0.890	586	7 130	是
晶华 I 线	4.457	9.99	0.33	0.008 9	0.003 18	0.854	4 550.5	17 015	是
晶华 II 线	4.492	9.99	0.18	0.009	0.003 40	0.874	2 693	11 385	是
晶东线	5.086	9.98	0.06	0.009	0.003 56	0.855	21 196	28 825	是

4 结论

针对配电网规划电气计算中无法确切得到基于馈线负荷的问题,提出将未来新增地块的负荷转变为电气馈线负荷的空间负荷分配方法,并提出了集潮流、短路、可靠性、N-1 校验于一体的电气计算方法。最后,结合德州晶华网格化规划项目,验证了电气一体化算法的正确性、快速性和适用性。

多能互补和智慧能源是电力行业未来的发展方向,下一步拟考虑将能源互联网规划的内容集成在配电网网格化规划软件中,基于电力物联网中将家电可控负荷转化成智能负荷的思路,进行电力物联网综合能源系统规划的建模,研究多能互补分布式综合供能系统及典型方案的应用。

参考文献

[1] 李本新, 韩学山, 蒋哲, 等. 计及网损的快速经济调度方法[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 90-95.
LI B X, HAN X S, JIANG Z, et al. A fast analytical

method for economic dispatch considering network losses[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(1): 90-95.
[2] 柴淑云. 电力系统中长期负荷预测方法的研究与软件开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
CHAI S Y. Research and software development of medium and long term load forecasting method in power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
[3] WILLIS H L. 配电系统规划参考手册[M]. 范明天, 刘健, 张毅威, 译. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2013: 560-570.
WILLIS H L. Distribution system planning reference manual[M]. Translated by FAN M T, LIU J, ZHANG Y W. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 560-570.
[4] 谷文卓. 配电网最大供电能力的定义、模型与计算方法[D]. 天津: 天津大学, 2012.
GU W Z. Definition, model and calculation method of maximum power supply capacity of distribution network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

- [5] 何跃辉. 基于配电网网格化的负荷预测方法[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
HE Y H. Load forecasting method based on grid of distribution network[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [6] 申超群. 基于负荷密度法与 LOGISTIC 模型法的饱和负荷预测研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
SHEN C Q. Research on saturated load forecasting based on load density method and LOGISTIC model method[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [7] 王艺婷. 基于最大供电能力的配电网负荷分配优化算法[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
WANG Y T. Load distribution optimization algorithm based on maximum power supply capacity[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [8] 王天华. 空间负荷预测中不确定性因素的处理方法[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 22-25.
WANG T H. The method of dealing with uncertain factors in spatial load forecasting[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 22-25.
- [9] 王振. 配电网潮流分析计算方法及数据库的开发研究[D]. 福州: 福州大学, 2006.
WANG Z. Research and development of power flow analysis and calculation method and database in distribution network[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [10] 丁腾波, 刘宏波, 吴聘. 智慧能源体系信息通信技术构架及实施方案[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 150-159.
DING T B, LIU H B, WU P. Information communications technology architecture and implementation scheme of smart energy system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 150-159.
- [11] 国网江苏省电力有限公司. 配电网单元制规划[Z]. 南京: 国网江苏省电力有限公司, 2018: 115-170.
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.. Unit system planning of distribution network[Z]. Nanjing: State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., 2018: 115-170.
- [12] 龚大德. 电力设备故障率统计方法的探讨[J]. 吉林电力技术, 1983, 20(6): 1-11.
GONG D D. Discussion on the statistical method of power equipment failure rate[J]. Jilin Electric Power, 1983, 20(6): 1-11.
- [13] 何沁春, 杨秀媛. 泛在电力物联网中将家电可控负荷转化成智能负荷的方法研究[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 94-102.
HE Q C, YANG X Y. Research on methods for converting controllable loads of household appliances into intelligent loads in the ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 94-102.
- [14] 刘敦楠, 张婷婷, 李华, 等. 面向泛在电力物联网的综合能源系统规划模型[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 50-55.
LIU D N, ZHANG T T, LI H, et al. Integrated energy system planning model for ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 50-55.
- [15] 张伟波, 谢玉荣, 杨帆, 等. 多能互补分布式综合供能系统及典型开发方案研究[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 245-251.
ZHANG W B, XIE Y R, YANG F, et al. Research on multi-energy complementary distributed integrated energy supply system and typical development scheme[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 245-251.

收稿日期: 2022-01-10.

作者简介:



迟福建

迟福建(1979), 男, 硕士, 高级工程师, 从事配电网规划管理工作, chifj@163.com;



吴倩

吴倩(1981), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化, 本文通信作者, wuqian7877772@126.com。

(责任编辑 尚彩娟)