

加强输电网可靠性的构造型启发式算法研究

李成鑫^{1,2} 汪颖^{1,2} 刘俊勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 提出了一种考虑概率可靠性指标的输电网加固规划方法。用蒙特卡罗方法模拟计及发电机和输电线强制停运率的电网运行状态集。对每一运行状态,采用直流潮流模型替代最大流最小割集的方法来计算各负荷节点的负荷缺额,进而提高可靠性指标计算精度。考虑到概率可靠性指标计算的复杂性,构建了一个全新的灵敏度指标,并采用结构型启发式算法来求解电网加固规划问题。基于一个6节点系统和一个18节点的实际系统的仿真结果证明了所提方法的有效性。

关键词: 概率可靠性; 节点可靠性; 输电网规划; 启发式算法

Abstract: A transmission enhancement planning (TEP) model considering the probabilistic reliability criteria is proposed. The Monte Carlo simulation is employed to simulate the system components states considering the force outage rates of the generators and the transmission lines. A DC power flow model is adopted to enhance the accuracy of the amount of load shedding at load bus so as to obtain the more accurate reliability index. Considering the complexity of calculation process of reliability assessment, a constructive heuristic algorithm (CHA) is used to solve the TEP problem. In addition, a novel sensitivity index is proposed to choose the most effective branch so as to enhance the system reliability. The simulations are carried out on the six-bus system derived from the Garver's system and an actual 18-bus system. The results verify the effectiveness of the proposed model.

Key words: probabilistic reliability; nodal reliability; transmission reinforcement planning; heuristic algorithm

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0066-07

0 引言

输电网规划一般以成本最小化为目标,综合考虑满足各种因素和指标,如可靠性指标、安全性指标、可再生能源吸纳等^[1]。可靠性一般包含安全性和充裕性的内涵^[2]。安全性主要是指系统承受各种扰动的能力,而充裕性主要是指考虑网络约束但不考虑扰动情况的发电容量和和电网传输容量^[2]。在输电网规划的前期阶段,主要考虑的是充裕性,也即这里所指可靠性。在非电力市场环境下,电网公司大多由政府支持,因此他们具有按一定可靠性要求向用户供电的社会责任。而在电力市场环境下,输电网必须具备高可靠性,以保证为所有的电力参与者提供一个稳定和宽松的竞争环境,因此,不管在什么样的电力环境下,可靠性指标都是一个在电网规划中十分重要的指标和考虑因素。在有关文献中,各种不同的可靠性指标用于评估系统的可靠性。

这些指标包括切负荷概率(loss of load probability, LOLP)^[3]、切负荷成本(loss of load cost, LOLC)^[4]、切负荷期望值(loss of load expectation, LOLE)^[5]、电量不足期望值(energy expected not supplied, EENS)^[5-6]等。

一般而言,输电网规划问题都是一个优化问题,可靠性要求可以作为目标函数的一部分^[7],也可以作为优化的约束条件处理^[8]。由于可靠性指标计算的复杂性,带可靠性指标的电网规划问题很难用纯数学规划来解。而进化算法^[2]、分支定界法^[5]、启发式算法^[9]等常用来解决这类问题。

自从 Garver 提出构造型启发式算法(constructive heuristic algorithm, CHA)^[9]以来,该算法已得到了很大的发展并应用于输电网规划^[10-11]。总体来讲,构造型启发式算法是一个迭代求解过程。对于一个复杂的优化问题,根据某个选择原则,每次迭代求解出一个当前状态下的最好候选解决方案,如此不断迭代,直到求解出一个满足相关要求的解决方

案。在用于求解输电网规划问题时,根据确定的选择原则,每一次迭代过程只选择一条支路(线路或者变压器)加入候选方案。选择原则的确定是构造型启发式算法的核心,这个选择原则常称为灵敏度指标(sensitivity index, SI)。

基于文献[5]的可靠性指标计算模型,提出了一种加强输电网可靠性的构造型启发式规划算法。文章的贡献主要集中于两点:采用直流潮流模型替代参考文献[5,12]中的最大流最小割集方法,以提高计算各负荷节点负荷缺额的概率密度函数的精度,进而提高可靠性指标值的计算精度;提出一个新的灵敏度指标计算模型,模型计及了发电机和支路的强制停运率。

1 负荷节点负荷缺额的概率密度函数

采用文献[5]提出的可靠性指标计算模型。模型的核心是获取各负荷节点的等价反负荷曲线。

要获得负荷节点的等价反负荷曲线,首先要获得各负荷节点在考虑元件强制停运率后的负荷缺额的概率密度函数。为此,必须首先计算在各种系统元件状态下的各负荷节点的负荷缺额。总体来说,这个问题可以用一个优化模型来描述。在文献[12]中,优化问题的目标函数是最小化各负荷节点的负荷缺额,其优化问题用网络流的方法来解。网络流的方法满足基尔霍夫电流定律^[13],但它不满足基尔霍夫电压定律^[14]。因此,网络流方法获得的各节点负荷缺额的准确性较差。这里用直流模型来描述规划阶段的输电网,从而提高各节点负荷缺额的准确性,因为直流模型不但满足基尔霍夫电流定律,同时满足欧姆定律^[10](即间接地满足了基尔霍夫电压定律)。因此用直流模型优化得到的各负荷节点的负荷缺额更准确、更贴近实际情况。为了最小化各负荷节点的负荷缺额,用如下模型来描述(模型(1)):

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NB} (L_{pi} - P_{Li}) / L_{pi} \quad (1)$$

s. t.

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^{n_i} P_{ij} \quad (2)$$

$$P_{ij} = b_{ij} \times n_{ij}^0 \times (\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

$$|P_{ij}| \leq n_{ij}^0 \times P_{ij}^{\max} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{Li} \leq L_{pi} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (6)$$

式中:NB为总节点数; L_{pi} 为节点*i*处的最大负荷; P_{Li} 表示节点*i*处可获得的功率; P_{Gi} 和 P_{Gi}^{\max} 表示节点*i*处的发电出力及其最大发电出力; P_{ij} 和 P_{ij}^{\max} 分别表示节点*i*和*j*之间的潮流及其最大传输容量; n_{ij}^0 为节点*i*和*j*之间的现有线路条数; n_i 为与节点*i*相连的通道数; b_{ij} 为节点*i*和*j*之间的单条线路电纳,为节点*i*的功角。

针对每一状态S(各元件投退状态的组合),用模型(1)可优化计算得到各负荷节点处的负荷缺额,同时知道每一种状态的概率,因此可得到各负荷节点负荷缺额的概率密度函数。

2 新的灵敏度指标

在文献[10]中,灵敏度指标的计算采用的是直流潮流模型,得到在固定网络拓扑下各线路有功功率的分配,且放宽了对增加的线路条数的限制,即允许增加的线路条数不是整数。文献[11]对灵敏度的计算进行了改进,采用交流潮流模型得到在固定网络拓扑下各线路视在功率的分配,也同样允许增加的线路条数不是整数。

可靠性指标LOLE和EENS虽然不是支路潮流的显函数,但它们都和各负荷节点处能获得的功率直接相关。因此,为了找到一条对提高可靠性最有效的支路,可以选择这样一条支路,这条支路加入系统后,各节点能获得的总功率值最大。这样一条最有效支路的选择过程可以描述为如下的混合二值型整数非线性规划(mixed binary integer nonlinear programming, MBINLP)问题(模型(2)):

$$\text{Min } P = \sum_{i=1}^{NB} (-P_{Li}) \quad (7)$$

s. t.

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (8)$$

$$P_{ij} = b_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) \quad (9)$$

$$|P_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) P_{ij}^{\max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{Li} \leq L_{pi} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (12)$$

$$\sum n_{ij} = 1 \quad (13)$$

$$n_{ij} \text{ binary integer}; (i, j) \in \Omega \quad (14)$$

式中: n_{ij} 为节点*i*和*j*之间增加的线路条数; Ω 表示

所有可能的线路走廊,其余参数同模型(1)。

关于上述混合二值型整数非线性规划问题,有以下 3 点需要特别注意:

1) 和文献[10-11]不同,因为考虑了发电机和支路状态的不确定性,在CHA的每一步迭代中,都要考虑很多种不同的系统状态。因此,在CHA的每一次迭代过程中,上述优化问题需要在每一种可能的系统状态下求解,求解的次数由系统各发电机和支路的状态组合数决定。 n_{ij}^0 表示在当前CHA迭代步骤时的系统拓扑结构,保持不变;但CHA每向前迭代一次, n_{ij}^0 要改变一次。

2) n_{ij} 是一个二值型整数决策变量, n_{ij} 的和为1,表示一次只能增加一条支路。如果用一个行向量 n 来表达 n_{ij} ,则 n 中只有一个元素值为1,其余全为0。

3) 上述混合二值型整数非线性规划问题的系统拓扑,是以CHA当前迭代步骤的现有系统拓扑为基础,考虑元件的强制停运率后的某一系统状态。假设系统元件状态为 S_k ,对应的概率为 $P(S_k)$,那么,通过上述混合二值型整数非线性规划问题求解得到的优化结果 n ,必然要和对应的状态概率 $P(S_k)$ 相关联才有意义。

假设在当前系统拓扑下,因考虑元件的强制停运率,共有 NS 种系统状态。若对于第 k 种状态,求解优化模型(2)获得了一条最有效的候选支路,记为向量 n_k ,则灵敏度指标可以表示为式(15)。

$$SI = \max\{SI_{ij} = \sum_{k=1}^{NS} P(S_k) \times n_k, n_{ij} \text{ is a element of } n_k\} \quad (15)$$

3 满足可靠性指标的输电网规划问题的求解

基于上述灵敏度指标,提出了以投资最小为目标、可靠性指标为约束的输电网规划模型的构造型启发式求解算法。所提方法的求解过程如图1所示,具体步骤如下:

1) 基于现有系统,利用蒙特卡罗方法产生考虑发电机和支路投退的系统状态集,针对每一种状态,利用模型(1)计算各负荷节点的负荷缺额,利用模型(2)计算最有效的新增支路。针对整个状态集的每一个状态都做以上优化计算后,可根据文献[5]中式(9)~式(17)评估可靠性指标LOLE和EENS,

利用上述式(15)计算当前系统拓扑下的灵敏度指标;

2) 检查可靠性指标,如满足可靠性指标要求,则跳到第4)步,否则进行第3)步;

3) 利用第1)步中计算得到的灵敏度指标,挑选一条支路(线路或变压器)加入候选支路库和现有系统,更新网络拓扑并返回第1)步;

4) 评估候选支路库中每一新增支路的冗余性。首先,根据投资额按降序排列新增支路;然后,去掉排名第一的支路,并重新评估去掉这一新增支路后系统可靠性指标是否符合要求。如果去掉后系统仍符合可靠性要求,说明去掉的这一新增支路确实是冗余的,则删除它;如果去掉后不符合可靠性指标要求,说明它是不可或缺的,将它保存进新增支路库。对去掉了排名第一的新增支路后的候选支路库重复这个过程,直到所有的候选新增支路都评估完,则新增支路库中的支路则为规划的新增支路结果。

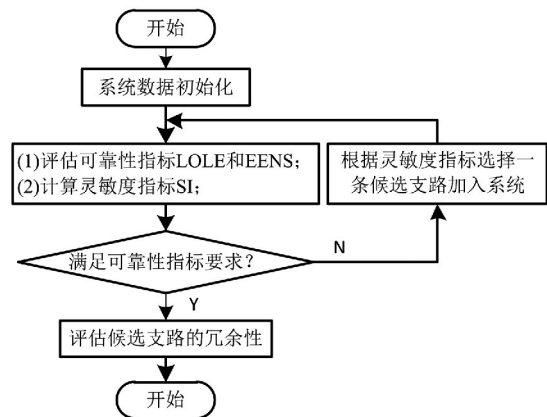


图1 输电网规划问题求解流程图

4 算例分析

所提方法的有效性用一个6节点和18节点的算例来检验。所有算法在Matlab 8.2环境下运行,计算机为32G内存的酷睿i7CPU的个人计算机。求解负荷缺额的优化模型(1)用YAMIP^[15]求解,而

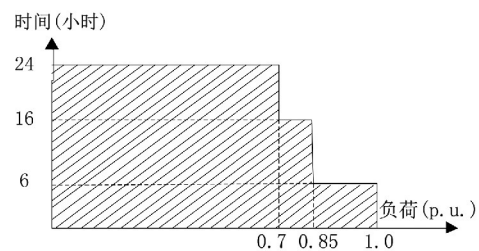


图2 负荷节点处的初始反负荷曲线

混合二值型整数非线性规划模型(2)用进化差分算法(differential evolution, DE)求解。不失一般性,在两个算例中,都假设各负荷节点的初始反负荷曲线是如图2所示的折线段。

4.1 6节点的Garver系统

作为第一个算例,由Garver提出的6节点算例^[9]将用于检验所提方法的有效性。图3的实线部分描述了系统的现有网络结构和规划年各节点预测负荷和发电机规划。节点6是一个具有7台发电机

组的新规划电厂。经过初步规划和考察,8个输电通道可新增线路:6个通道是老通道(1-2, 1-4, 1-5, 2-3, 2-4和3-5),另两个通道(2-6和4-6)是连接新增节点6和现有系统最近的两个通道^[13]。线路参数取自于文献[13]。为了考虑发电机组的强制停运率,每个发电厂用多台发电机来表达。由于这里是研究输电网的规划,为了消除因考虑了发电机组强制停运率而导致发电容量不足的问题,对所用发电机组容量稍作扩充。为了简化而又

表1 所提方法应用于Garver系统的规划过程(可靠性指标值为0的节点省略)

步骤	新增线路	母线编号	EENS/(MWh·a ⁻¹)	LOLE/(H·a ⁻¹)	SI[1e-4]
0	base	1	6.5	0.38	SI ₁₋₂ = 0, SI ₁₋₄ = 0, SI ₁₋₅ = 0, SI ₂₋₃ = 0, SI ₂₋₄ = 0, SI ₂₋₆ = 484.5, SI ₃₋₅ = 0.45, SI ₄₋₆ = 9 511.9
		2	1 798 703.6	8 760	
		4	191 015.6	6 005.43	
		5	1 261 342.6	8 760	
		Sys.	3 251 068.3	8 165.85	
1	Line ₄₋₆	2	1 543 117.0	8 760	SI ₁₋₂ = 0, SI ₁₋₄ = 0,
		4	1 043.0	33.21	SI ₁₋₅ = 0, SI ₂₋₃ = 47.6,
		5	1 144 277.5	8 760	SI ₂₋₄ = 0, SI ₂₋₆ = 9 802.43,
		Sys.	2 688 437.5	8 198.46	SI ₃₋₅ = 47.2, SI ₄₋₆ = 98.7
		2	193 194.2	5 885.92	SI ₁₋₂ = 0, SI ₁₋₄ = 0,
2	Line ₂₋₆	4	340.0266	8 666.63	SI ₁₋₅ = 0, SI ₂₋₃ = 3.5,
		5	1 026 231.3	8 758.64	SI ₂₋₄ = 0, SI ₂₋₆ = 425.9,
		Sys.	1 559 691.5	8 241.44	SI ₃₋₅ = 49.3, SI ₄₋₆ = 9 516.8
		2	157 635.2	5 967.18	SI ₁₋₂ = 0, SI ₁₋₄ = 0,
		4	3 362.3	85.56	SI ₁₋₅ = 0, SI ₂₋₃ = 46.9,
3	Line ₄₋₆	5	959 520.7	8 744.35	SI ₂₋₄ = 0, SI ₂₋₆ = 9 749.4,
		Sys.	1 120 518.2	6 386.54	SI ₃₋₅ = 54.5, SI ₄₋₆ = 143.4
		2	6 852.3	278.69	SI ₁₋₂ = 0.43, SI ₁₋₄ = 0.44,
		4	1 909.3	58.90	SI ₁₋₅ = 0, SI ₂₋₃ = 0.2,
		5	806 612.2	8 744.28	SI ₂₋₄ = 0, SI ₂₋₆ = 430.5,
4	Line ₂₋₆	Sys.	815 373.8	5 463.14	SI ₃₋₅ = 9 464, SI ₄₋₆ = 98.4
		2	221 543.2	5 833.17	SI ₁₋₂ = 0, SI ₁₋₄ = 0,
		4	3 648.3	85.33	SI ₁₋₅ = 0, SI ₂₋₃ = 3.9,
		5	36 738.9	2 279.59	SI ₂₋₄ = 45.6, SI ₂₋₆ = 9 665,
		Sys.	261 930.4	2 704.22	SI ₃₋₅ = 94, SI ₄₋₆ = 183.4
5	Line ₃₋₅	2	6 993.2	250.98	SI ₁₋₂ = 48.8, SI ₁₋₄ = 44.3,
		4	3 740.3	85.57	SI ₁₋₅ = 47.3, SI ₂₋₃ = 1.3,
		5	7 365.5	193.56	SI ₂₋₄ = 1.1, SI ₂₋₆ = 515,
		Sys.	18 099.0	165.11	SI ₃₋₅ = 99.1, SI ₄₋₆ = 96.7
		2	87.59	3.52	SI ₁₋₂ = 48.8, SI ₁₋₄ = 0.8,
6	Line ₂₋₆	4	2 013.56	59.87	SI ₁₋₅ = 47.5, SI ₂₋₃ = 1.3,
		5	3 669.45	122.51	SI ₂₋₄ = 0.6, SI ₂₋₆ = 92.8,
		Sys.	5 770.6	65.23	SI ₃₋₅ = 103.3, SI ₄₋₆ = 102.3
		2	106.61	4.0	SI ₁₋₂ = 0.2, SI ₁₋₄ = 0,
		4	2 325.24	85.0	SI ₁₋₅ = 4.5, SI ₂₋₃ = 1.5,
7	Line ₂₋₆	5	51.90	3.01	SI ₂₋₄ = 0, SI ₂₋₆ = 8.7,
		Sys.	2 483.75	34.87	SI ₃₋₅ = 0.4, SI ₄₋₆ = 97.7

不失一般性 输电线和发电机组的强制停运率分别统一设置为 0.5% 和 1%。

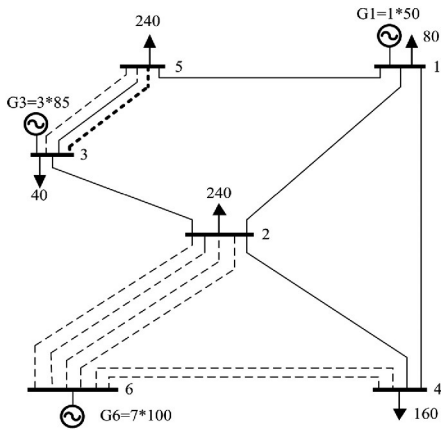


图3 Carver 6节点系统

用所提CHA方法规划上述6节点系统,以达到预定的可靠性指标,每一步迭代过程中的可靠性指标和灵敏度指标如表1所示。

假设要求系统的切负荷期望值指标 $LOLE_{sys}$ 为100 h/a,则在规划迭代过程中的第7步达到系统可靠性指标要求,这时 $LOLE_{sys}$ 为65.23 h/a,结果见表1中第7步。通过对前7步新增的候选线路进行冗余性检验,所有7条线都是必须的(2-6:4条,4-6:2条,3-5:1条)。新增线路如图4中细虚线所示。这时,虽然系统可靠性指标达到了要求,但是节点5的可靠性指标其实是大于要求的指标值100 h/a的。

如果将可靠性指标换成节点可靠性指标, $LOLE_{bus} = 100$ h/a,则在上述规划结果的基础上,还需要另外再加一条新线路(线路3-5),如图3中粗虚线所示,计算过程如表1中第8步。对比上述系统和节点可靠性指标要求下的规划结果可见,对于相同的可靠性指标值,节点可靠性的要求是高于系统可靠性的。

4.2 应用于18节点实际系统的规划

算例2为一个18节点的实际系统(某省西部220 kV以上电网),如图4中实线部分所示。图中节点1和4是500 kV变电站,其他的是220 kV变电站。系统的相关数据(发电机、负荷和线路)如表2和表3所示。在表3中,FB和TB分别表示线路首端节点和末端节点,B表示线路电纳,FOR表示强制停运率。

该地区经济发展的需要,节点5、8和11处的负荷将各增加80 MW、40 MW和100 MW。因此,其输

电网需要加强,以达到保证每个负荷节点的可靠性指标 $LOLE_{bus}$ 小于50 h/a。

表2 18节点系统的发电和负荷数据

母线	负荷/MW	发电/MW	母线	负荷/MW	发电/MW
1	80	0	10	240	0
2	240	0	11	20	0
3	30	0	12	180	0
4	50	300 × 4	13	170	0
5	140	0	14	20	2 × 330
6	150	0	15	40	0
7	40	0	16	150	0
8	40	0	17	60	0
9	130	0	18	20	2 × 300

表3 18节点系统的输电线路数据

FB	TB	B/(p.u.)	最大功率/MW	线路条数	FOR
1	2	0.037 4	200	2	0.001 2
1	4	0.321 0	1 000	2	0.001 5
1	5	0.043 5	200	1	0.001 0
1	6	0.025 9	200	1	0.001 2
2	6	0.005 8	200	1	0.002 0
2	11	0.021 8	200	1	0.001 2
3	4	0.023 3	200	1	0.001 4
3	7	0.021 8	250	1	0.002 0
4	9	0.016 2	250	2	0.002 5
4	10	0.020 0	200	2	0.002 4
5	16	0.025 6	250	1	0.001 5
6	7	0.021 0	200	1	0.002 5
6	11	0.011 7	200	1	0.001 1
7	8	0.021 3	200	1	0.002 1
7	12	0.012 5	200	1	0.002 2
7	18	0.014 0	200	1	0.002 5
8	12	0.024 6	180	1	0.001 4
9	13	0.023 0	200	1	0.001 6
10	14	0.025 0	180	1	0.002 0
10	15	0.011 7	200	1	0.001 5
11	16	0.021 5	160	2	0.001 2
11	17	0.023 1	200	1	0.002 2
12	13	0.029 0	200	2	0.001 2
13	14	0.020 9	200	2	0.001 5
14	15	0.046 2	180	1	0.001 0
15	18	0.082 6	200	1	0.001 2
17	18	0.010 9	180	1	0.002 0

表 4 加强后的 18 节点系统可靠性指标

步骤	新增线路	母线编号	EENS/(MWh · a ⁻¹)	LOLE/(h · a ⁻¹)	SI [1e - 4]
0	base	2	9 454.9	257.86	SI ₁₋₂ = 8.9 ,
		5	559 074.3	8 736.45	SI ₁₋₅ = 9 556.1 ,
		10	138.7	2.35	SI ₂₋₁₁ = 3.6 ,
		sys.	568 667.9	3 563.98	SI ₄₋₆ = 407.0
1	Line ₁₋₅	2	34 320.2	415.90	SI ₁₋₂ = 26.8 ,
		5	1 674.9	25.34	SI ₁₋₅ = 18.33 ,
		10	1 005.1	12.79	SI ₃₋₇ = 7.1 ,
		13	101.3	1.55	SI ₇₋₁₈ = 209.3 ,
		sys.	37 101.5	126.87	SI ₁₃₋₁₄ = 2.7 , SI ₁₇₋₁₈ = 379.6
2	Line ₁₇₋₁₈	2	1 253.0	15.89	满足可靠性指标要求 , 不再计算 SI 值。
		5	552.6	15.99	
		10	2 344.0	20.67	
		13	71.5	6.62	
		sys.	4 221.1	17.77	

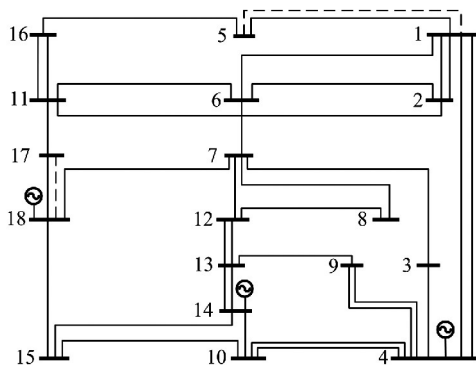


图 4 18 节点的初始及加强可靠性后的网架结构

用所提方法加强系统的可靠性,其优化结果如图 4 所示,虚线表示新增线路。表 4 展示了整个优化过程中每一步的相关指标和参数。为简化表格,表 4 中所有 LOLE 值小于 1 的节点的可靠性指标都忽略不计,所有小于 1e - 4 的灵敏度指标也都忽略不计。

5 结 语

以上提出了一个满足可靠性指标的经济最优输电网络规划方法。该方法可作为输电网规划过程中的重要一步,用以保证规划后的网络能保证系统的可靠性,可用于在进行详细的安全性校核之前获得一个宏观的规划。采用直流潮流模型替代最大流最小割集方法,提高各系统状态下各负荷节点负荷缺额概率密度函数的计算准确率,进而提高可靠性指标

值的计算。提出了一个考虑元件强制停运率的灵敏度指标,以期在构造型启发式算法的每一迭代过程中选择一条对增强可靠性最有效的新增支路。所提方法在一个 6 节点系统和 18 节点实际系统上的仿真结果说明,所提方法是有效的,既可用于保证系统可靠性指标,也能用于满足节点可靠性指标;相同的可靠性指标值,节点可靠性要求严于系统可靠性。

参 考 文 献

- [1] Hemmati R, Hooshmand R A, Khodabakhshian A. Comprehensive Review of Generation and Transmission Expansion Planning[J]. IET Gener. Transm. Distrib., 2013, 7(9): 955 - 964.
- [2] Zhao J H., Foster J, Dong Z Y., et al. Flexible Transmission Network Planning Considering Distributed Generation Impacts[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2011, 26(3): 1434 - 1443.
- [3] 张紫凡. 不同时间尺度的风功率建模及 LOLP 算法研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(11): 1658 - 1664.
- [4] Leite da Silva A M, Rezende L S, Manso L A F, et al. Transmission Expansion Planning: A Discussion on Reliability and "N - 1" Security Criteria[C]. IEEE 11th Int. Conf. Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Singapore, 2010: 244 - 251.
- [5] Choi J, Tran T, El - Keib A A, et al. A Method for Transmission System Expansion Planning Considering Probabilistic Reliability Criteria[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2005, 20(3): 1606 - 1615.

[6] 赵渊,张煦,杨清. 基于可靠性成本/效益分析的电网计划检修周期优化[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):54-59.

[7] Orfanos G A,Georgilakis P S,Hatziaargyriou N D. Transmission Expansion Planning of Systems with Increasing Wind Power Integration[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2013,28(2):1355-1362.

[8] MCD Rochaa JT Saraivab. A Multiyear Dynamic Transmission Expansion Planning Model Using a Discrete Based EPSSO Approach[J]. Electric Power Systems Research, 2012(93):83-92.

[9] Garver L L. Transmission Network Estimation Using Linear Programming[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System,1970(7):1688-1697.

[10] Sánchez I G,Romero R,Mantovani J R S, et al. Transmission-expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear-programming Technique[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.,2005,152(6):763-769.

[11] Rider M J,Garcia A V,Romero R. Power System Transmission Network Expansion Planning Using AC Model[J]. IET Gener. Transm. Distrib.,2007,1(5):731-742.

[12] Choi J,Billinton R,Futuhi-Firuzabed M. Development of a New Nodal Effective Load Model Considering of Transmission System Element Unavailabilities[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.,2005,152(1):79-89.

[13] Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning[J]. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.,2002,149(1):27-36.

[14] Jabr R A. Optimization of AC Transmission System Planning[J]. IEEE Trans. Power Syst.,2013,28(3):2779-2787.

[15] Löfberg J. YALMIP: A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB[C]. Proceedings of the CACSD Conference,2004,Taipei,Taiwan.

作者简介:
李成鑫(1976)博士,主要从事电网规划和主动配电网研究。
(收稿日期:2015-11-05)

(上接第25页)

首先根据电缆交叉互联单元的等值电路,分析了单回路电缆金属护套感应电压与环流的计算过程。结合电缆线路敷设的实际情况,推导出多回电缆同通道敷设时金属感应电压与环流的计算模型。在模型推到过程中,考虑了回路电缆线芯三相电流不平衡、交叉互联单元内各段段长和敷设间距以及排列方式变化等因素的影响。

所推导得出的计算模型为关于护套环流的常系数线性方程组,可以采用高斯列主元素消去法进行求解。

参考文献

[1] 牛海清,王晓兵,蚁泽沛,等. 110kV单芯电缆金属护套环流计算与试验研究[J]. 高电压技术,2005,31(8):15-17.

[2] 张全胜,王和亮,周作春. 110kV XLPE 电缆金属护套交叉互联接地探讨[J]. 高电压技术,2005,31(11):71-73.

[3] 王敏. 10kV单相电力电缆屏蔽层的感应电压和环流[J]. 高电压技术,2002,28(5):30-32.

[4] 贾欣,喻明. 三回路单芯电缆护套感应电势的计算[J]. 高电压技术,2000,26(5):61-62.

[5] 徐欣,陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之一——感应电流的计算和预控[J]. 电线电缆,2010(5):42-46.

[6] 徐欣,陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之二——计算程序的编制和应用[J]. 电线电缆,2010(6):34-37.

[7] 刘英,王磊,曹晓珑. 双回路电缆护套环流计算及影响因素分析[J]. 高电压技术,2007,33(4):143-146.

[8] 郑肇骧,王焜明. 高压电缆线路[M]. 北京:水利电力出版社,1983.

[9] 樊友兵,赵健康,钱康,等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化[J]. 高电压技术,2010,36(10):2607-2612.

[10] 田金虎,刘渝根,赵俊光,等. 多回同相多根并联高压电力电缆电流分布及金属护套环流计算[J]. 高电压技术,2014,40(1):153-159.

作者简介:
刘科(1973)高级工程师,从事电力系统规划与设计方面的研究;
张亮平(1984)工程师,从事输电线路设计方面的研究;
温晓舫(1968)高级工程师,从事输电线路设计方面的研究。
(收稿日期:2015-12-07)