

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.022

基于无功调压的高压电抗器优化配置研究

汪莹¹, 黄民翔^{1*}, 傅守强²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027;
2. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100045)

摘要:针对高压电抗器的优化配置问题,提出了一种依据层次分析法构建的以电压指标为主、综合考虑网损指标和无功动作指标的高抗优化配置指标体系,并在改进层次分析法和熵权系数法的基础上建立了一种综合赋权方法,通过该指标体系对高抗优化配置备选方案进行了评价打分,得到了高抗最佳配置方案。研究表明,该模型得到的最佳方案能有效改善高抗配置地点的母线电压,并可以提升电网的整体性能。

关键词:高压电抗器;电压调整;层次分析法;熵权系数法

中图分类号:TM472

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0696-06

Optimal allocation of high voltage reactor based on voltage adjustment

WANG Ying, HUANG Min-xiang, FU Shou-qiang

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. State Grid Jibei Electric Economic Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: Aiming at the optimal allocation of high voltage reactor, the index system was built up in analytic hierarchy process, considering the voltage index in main and the network loss index and reactive operating index as well. The index was measured by a method based on the advanced analytic hierarchy process and the entropy weight coefficient theory. The model could be adopted by the ranking of alternatives in order to get the best scheme for high voltage reactor configuration. The experimental results show that the best scheme can effectively approve the bus voltage of high voltage reactor configuration location, and improve the overall performance of power system.

Key words: high voltage reactor; voltage adjustment; analytic hierarchy process; entropy weight coefficient method

0 引言

在电力系统中传统无功补偿措施一般是采用并联低压电抗器(低抗)进行感性无功补偿和电压调节,因此这方面的研究文献也很多^[1-5],而高压电抗器(高抗)主要发挥抑制工频过电压和潜供电流的作用^[6]。现今我国超高压线路应用越来越广泛,网络结构越来越紧密,而低抗在占地受限、占用主变容量、运行可靠性受主变故障影响等方面的不足,也使得高压电抗器参与无功补偿和电压调节应受到更多

关注和研究^[7-8]。

高压电抗器通常在超高压线路投运初期时根据线路负载情况及充电功率进行配置。但是随着超高压线路的不断增加以及电网结构的变化,部分高压电抗器由于和电网结构不相适应从而被迫退出运行,会造成很大的投资损失和设备浪费。因此对高压电抗器优化配置的需求十分迫切,基于无功调压的高压电抗器优化配置研究也具有重要意义。

本研究建立基于无功调压的高抗优化配置模型,并采用层次分析法,构建高抗优化配置指标体系。

1 高抗优化配置模型和算法

$$f_3 = \frac{\sum_{j=1}^M f_3^{(j)}}{M} \quad (8)$$

1.1 高抗优化配置指标

高抗优化配置指标应体现电网安全性和经济性。其中安全性的指标需首先满足《电力系统安全稳定导则》^[9]中对节点电压合格率的要求后再体现高压电抗器对电压调节的作用,经济性指标主要包括系统网损和无功动作指标。本研究涉及电网的多种运行方式,在下文对指标的介绍中,采用 M 表示运行方式个数。

(1) 电压指标:

① 电压合格率 δ :

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^M N^{(j)}}{M} \times 100\%, j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (1)$$

式中: $N_M^{(j)}$ —方式 j 下的考察节点数, $N^{(j)}$ —在方式 j 下节点电压合格的节点数, M —运行方式总数。

对于节点 i , 若其方式 j 下的电压在方式 j 下该节点允许电压范围内, 即: $\underline{V}_i^{(j)} \leq V_i^{(j)} \leq \bar{V}_i^{(j)}$, 则该节点电压合格, 否则该节点电压不合格。

② 电压偏移总和 f_1 :

$$f_1^{(j)} = \sum_{i=1}^{N_M} \left| \frac{V_i^{(j)} - V_i^{\text{spec}}}{V_i^{\text{spec}}} \right|, j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2)$$

式中: $V_i^{(j)}$ —节点 i 在第 j 种方式下的电压幅值, V_i^{spec} —节点 i 上的指定电压幅值, N_M —考察节点数。其采用的电压偏移指标值为所有方式下电压偏移的最大值。

$$f_1 = \max \{ f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_1^{(3)}, \dots, f_1^{(M)} \} \quad (3)$$

③ 节点电压波动 f_2 :

$$V_i^{\max} = \max \{ V_i^{(1)}, V_i^{(2)}, V_i^{(3)}, \dots, V_i^{(M)} \} \quad (4)$$

$$V_i^{\min} = \min \{ V_i^{(1)}, V_i^{(2)}, V_i^{(3)}, \dots, V_i^{(M)} \} \quad (5)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_M} (V_i^{\max} - V_i^{\min}) \quad (6)$$

式中: V_i^{\max} —节点 i 的电压幅值在 M 种方式下的最大值, V_i^{\min} —电压幅值在 M 种方式下的最小值。其采用的电压波动指标值是最大电压与最小电压的差值。

(2) 网损指标:

$$f_3^{(j)} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}^{(j)} - \sum_{i=1}^{N_D} P_{Di}^{(j)}, j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (7)$$

式中: 系统网损量 f_3 —网损指标, $P_{Gi}^{(j)}$ —在第 j 种方式下发电机 i 的有功出力, $P_{Di}^{(j)}$ —第 j 种方式下负荷 i 的有功用电量, N_G —发电机节点数, N_D —负荷节点数。本研究采用的网损指标值为所有计算方式的平均网损。

(3) 无功动作指标:

无功动作指标包括变压器档位调节量和无功补偿装置调节量, 表征某电网在不同运行方式间变化时的运行成本。

① 变压器档位调节量 f_4 :

$$Tap^{(j)} = \sum_{i=1}^{N_t} tap_i^{(j)}, j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (9)$$

$$f_4 = \max \{ Tap^{(1)}, Tap^{(2)}, \dots, Tap^{(M)} \} - \min \{ Tap^{(1)}, Tap^{(2)}, \dots, Tap^{(M)} \} \quad (10)$$

式中: $tap_i^{(j)}$ —第 j 种方式下第 i 台变压器调节后的档位, N_t —调压变压器总数, $Tap^{(j)}$ —第 j 种方式下电网所有可调压变压器调节后的档位和。方式间变压器档位最大调节量 f_4 定义为所有方式中最大档位和与最小档位和的差值。

② 无功补偿装置投切调节量 f_5 :

$$Q_g^{(j)} = \sum_{i=1}^{N_Q} (C_i^{(j)} + X_i^{(j)}), j = 1, 2, 3, \dots, M \quad (11)$$

$$f_5 = \max \{ Q_g^{(1)}, Q_g^{(2)}, \dots, Q_g^{(M)} \} - \min \{ Q_g^{(1)}, Q_g^{(2)}, \dots, Q_g^{(M)} \} \quad (12)$$

式中: $C_i^{(j)}$, $X_i^{(j)}$ —第 j 种方式下第 i 个负荷无功补偿点补偿的电容和电抗容量; N_Q —配置了电容和电抗器组的负荷无功补偿点总数。方式间无功补偿装置最大投切容量 f_5 定义为所有方式中最大无功补偿容量与最小无功补偿容量的差值。

1.2 多目标决策赋权方法

该方法考虑将主观权重和客观权重相结合进行多目标决策的指标赋权。主观赋权引入用标度扩展法构造判断矩阵的改进层次分析法, 客观赋权采用熵权系数法, 用主观权重和客观权重相结合的权重值对各高抗优化配置方案进行评价。

1.2.1 基于改进层次分析法的主观权重计算

层次分析法是美国运筹学家 T. L. Satty 于 20 世纪 70 年代创立的^[10]。层次分析法由于计算权重时可能对判断矩阵反复进行一致性检验因而计算过程较为繁琐。用标度扩展法构造判断矩阵都是一致的, 因此不需进行一致性检验, 也可以提高层次分析法的可靠性^[11]。

扩展标度法建立判断矩阵首先将 n 个指标按照重要性排序, 并依次进行比较后转换为一定标度 t_i , 然后按照指标重要程度的传递性计算出判断矩阵中的其他元素值, 从而得到以下判断矩阵^[12]:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \cdots & t_1 \cdots t_{n-1} \\ \frac{1}{t_1} & 1 & t_2 & \cdots & t_2 \cdots t_{n-1} \\ \frac{1}{t_1 t_2} & \frac{1}{t_2} & 1 & \cdots & t_3 \cdots t_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{t_1 \cdots t_{n-1}} & \frac{1}{t_2 \cdots t_{n-1}} & \frac{1}{t_3 \cdots t_{n-1}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据矩阵 R 可计算各指标的权重值为:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}}} \quad (14)$$

式中: w_i —由标度扩展法构造判断矩阵的改进层次分析法计算得出的高抗优化配置各指标的主观权重值。

1.2.2 基于熵权系数法的客观权重计算

考虑系统具有 n 个结果的概率试验, 并设这些结果各自具有离散概率 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 时, 则该系统的熵^[13]为:

$$E = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i, 0 \leq P_i \leq 1; \sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (15)$$

E 用来作为系统不确定性的量度。 E 越大则系统具有越大的不确定性, $E = 0$ 时系统 S 不存在任何不确定性^[14]。

熵权系数法根据熵的概念和性质建立多指标决策评价模型, 其过程如下^[15]:

设有待评方案共 m 个, 每个方案有 n 个评价指标, m 种方案对应于 n 个指标而形成的原始指标矩阵为 $R = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

首先对指标进行归一化。因任意, 可用以下公式对指标进行归一化处理。

$$d_{ij} = \frac{x_{\min}}{x_{ij}} \quad (16)$$

式中: x_{\min} — R 中每列的最小值, d_{ij} —第 i 个方案的第 j 个指标的归一化结果。归一化之后可以保证: ① $0 \leq d_{ij} \leq 1$; ② d_{ij} 越大, 则 x_{ij} 越小, 意味着指标越优。

根据定义, 用 n 个评价指标评价 m 个待选方案的熵 E 为:

$$E = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} \ln d_{ij} \quad (17)$$

评价指标 j 的评价决策重要性的熵 e_j 为:

$$e_j = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{d_{ij}}{d_j} \ln \frac{d_{ij}}{d_j} \quad (18)$$

其中:

$$d_j = \sum_{i=1}^m d_{ij} \quad (19)$$

对熵 e_j 进行归一化后得到指标 j 的客观权重为:

$$\theta_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j}, 0 \leq \theta_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \theta_j = 1 \quad (20)$$

对于高抗优化配置的各项指标, 可以根据每个方案最优潮流计算出的每一项指标的熵值大小确定对应的权重。若某项指标熵值较小, 则说明该项指标在不同方案间数据变动程度小, 反之则说明数据变动程度大。数据变动程度大的指标在客观赋权的过程中权重值就大。

1.2.3 组合权重计算

采用层次分析法对指标进行分层分类的指标体系框架如图 1 所示。

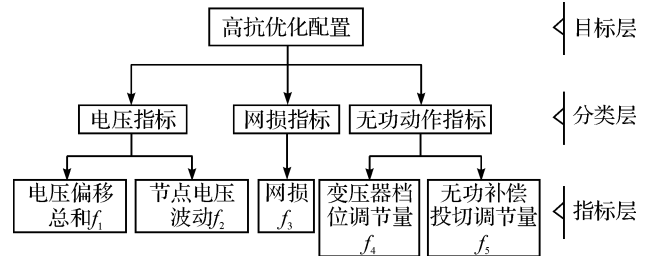


图 1 高抗优化配置指标体系框架

自下而上分别为指标层、分类层和目标层。分类层的 3 个指标分别为高抗优化配置的电压指标、网损指标和无功动作指标。指标层的指标分别从属于分类层的某个指标, 如电压偏移总和 f_1 和节点电压波动 f_2 从属于分类层的电压指标。

(1) 指标层赋权方法。在指标层对每个分类下的指标采用客观的熵权系数法计算权重, 从而能让在方案间数据变动程度大的指标在客观赋权的过程中权重值大。

(2) 分类层求值与赋权方法。首先将分类层某一指标下所属的指标层的指标值按照指标层的赋权方法进行加权求和后, 可以得到分类层该指标的指标值。其次再对分类层进行赋权。分类层赋权采用主观方法与客观方法结合, 这是因为主观方法能较好地体现人的经验和判断, 而客观方法能反映数据本身的规律, 主、客观结合就能在兼顾人的经验基础上尽量减小赋权的主观随意性。在分别用主观的由标度扩展法构造判断矩阵的改进层次分析法得到主观权重, 以及用客观的熵权系数法得到客观权重后, 采用下式计算得综合权重:

$$a_i = \frac{w_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n w_i \theta_i}, 0 \leq a_i \leq 1, \sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (21)$$

(3)目标值求值方法。将分类层的指标值加权求和就可以得到目标层的指标值,也就是高抗优化配置方案的最终值。通过比较每个方案的最终值大小即可判断得到其中的最优方案。

1.3 高抗优化配置运算流程

高抗优化配置运算流程的具体步骤如下:

步骤一。综合考虑母线电压波动大、运行电压最高、线路电容效应和网损最严重、以及厂站感性无功补偿度最低的因素,提出高抗需配置的地点。将电网中没有投入运行或使用率最低的高抗作为可进行配置的高抗设备。综合比较分析之后,提出高抗优化配置备选方案。

步骤二。在夏大、夏小、冬大、冬小4个运行方式下利用PSASP对电网进行最优潮流计算。得到各高抗优化配置方案的最优潮流计算结果。

步骤三。计算各方案的电压合格率 δ ,淘汰电压合格率不满足要求的方案。

步骤四。计算各方案的 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 指标值,并进行归一化处理。

步骤五。依据上述多目标决策赋权方法,得到 f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 指标的权重。

步骤六。依据各指标的值和权重,计算得到高抗优化配置的最优方案。

2 仿真算例

本研究以某省330 kV电网实例进行仿真计算。根据该省电网运行情况可知,该省在峰荷时北部地区电压较低,在谷荷时南部地区电压水平较高。因此,高抗配置地点将在上述电压波动较大地区范围内进行选择。上述两个地区电网结构图如图2、图3所示。

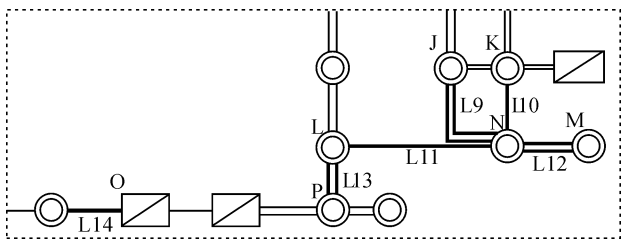


图2 该省南部部分地区电网结构图

本研究综合分析该省330 kV电网中电压最高以及电压波动最大的母线分布区域,感性无功补偿度未达到运行所需容量的厂站(线路),以及因路径较长且线路输送功率较大而存在网损较大的线路分布情况(如图2与图3中加粗的线路所示),提出高抗需配置的线路,分析线路两端厂站的感性无功补偿度之后选

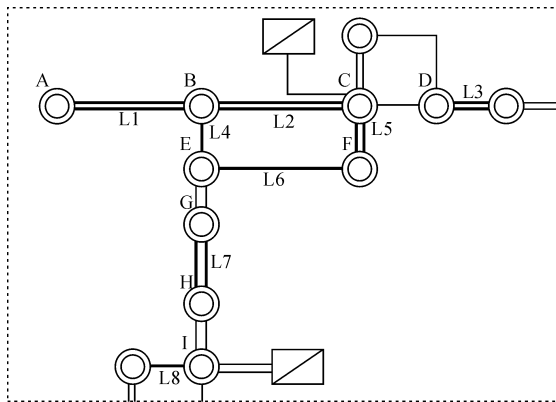


图3 该省北部部分地区电网结构图

择补偿度较低的厂站作为高抗配置地点。该省330 kV电网中目前没有投入运行或使用率较低的高压电抗设备共有5台,综合提出的可进行配置的高抗设备与配置地点,得到21种高抗优化配置备选方案。以高抗现状配置地点(包括未投入的情况)为原方案,共有22种备选方案(如表1所示)。

表1 高抗优化配置备选方案

方案编号	高抗配置方式									
	高抗1		高抗2		高抗3		高抗4		高抗5	
	线路	厂站	线路	厂站	线路	厂站	线路	厂站	线路	厂站
0	不接入		不接入		不接入		L8	I	L4	B
1	L1	A	L6	E	L5	F	L8	I	L4	B
2	L1	A	L6	F	L5	F	L8	I	L7	G
3	L1	A	L6	F	L11	N	L8	I	L7	H
4	L1	A	L6	F	L10	N	L7	H	L2	B
5	L1	A	L6	F	L14	O	L7	H	L4	B
6	L6	F	L13	P	L11	L	L7	H	L2	C
7	L1	A	L5	F	L9	J	L7	G	L2	C
8	L1	A	L6	E	L11	N	L5	F	L13	P
9	L1	A	L5	C	L12	N	L5	F	L11	L
10	L1	A	L6	F	L14	O	L11	L	L12	M
11	L6	F	L10	N	L11	L	L3	D	L12	M
12	L1	A	L10	N	L11	L	L7	G	L2	C
13	L1	A	L14	O	L11	N	L8	I	L7	G
14	L1	A	L6	F	L13	P	L9	J	L3	D
15	L1	A	L6	F	L9	J	L11	L	L3	D
16	L1	A	L6	F	L12	M	L8	I	L3	D
17	L6	F	L5	C	L11	L	L8	I	L7	G
18	L1	A	L5	C	L12	N	L5	F	L11	L
19	L1	A	L6	F	L10	K	L8	I	L3	D
20	L6	F	L13	O	L11	N	L9	J	L13	L
21	L13	P	L14	N	L11	M	L5	F	L2	C

本研究采用PSASP 6.282电力系统综合分析程序对22种高抗优化配置方案在夏大、夏小、冬大、冬小4种运行方式下进行最优潮流分析,得到各方案的最优潮流计算结果。对各方案依次分别检验电压合格率、各指标值以及指标体系权重的计算,依据各指标的值

和权重,计算得到高抗优化配置的最优方案。

各方案的最终值按照降序排列结果如表 2 所示。

表 2 各方案最终值的降序排列结果

编号	方案名称	最终值
1	方案 21	0.943 8
2	方案 9	0.931 7
3	方案 20	0.925 5
4	方案 14	0.896 3
5	方案 18	0.891 0
6	方案 7	0.886 7
7	方案 10	0.885 1
8	方案 4	0.884 2
9	方案 16	0.880 6
10	方案 2	0.877 6
11	方案 15	0.876 6
12	方案 17	0.875 6
13	方案 6	0.852 4
14	方案 11	0.851 4
15	原方案	0.830 9
16	方案 19	0.819 6
...

可以发现高抗优化配置备选方案中有 14 种方案的指标加权求和最终值优于原方案,即相对于原有的高抗配置方式,新设计的 14 种高抗配置备选方案对电网整体性能的提升有较大效果。其中方案 21 最优值为 0.943 8 为最高,因此确定方案 21 为高抗优化配置最优方案。

3 结果分析

3.1 最优方案对电网整体性能的改善作用

对比最优方案与原方案各项指标结果如表 3 所示(表中数据均为标幺值)。

表 3 最优方案与原方案各项指标对比

方案名称	最大电压偏移 f_1	最大电压波动 f_2	平均网损 f_3	最大档位变动 f_4	最大投切容量 f_5
原方案	35.577 2	24.884 8	2.445 9	270	4.44
最优方案	35.323 2	20.411 6	2.416 9	259	5.09

由表 3 可见,高抗优化配置之后能较好的改善影响电网整体性能的各项指标。其中最大电压偏移指标下降 0.254,即以 330 kV 作为基准电压时,最优方案电压偏移较原方案减少 83.82 kV;最大电压波动指标下降 4.473 2,即最优方案相较于原方案在 4 种运行方式中所有电压波动之和减少 1 476 kV;平均网损指标下降 0.029,即最优方案在 4 种运行方式下网损平均值较于原方案减少 2.9 MW(基准功率为 100 MW)。此外,最优方案在 4 种运行方式之间变压器档位调节量

较原方案下降 11 次·挡,无功补偿装置投切调节量上升 0.65,即上升 650 kVar。

由此可见,采用该高抗优化配置模型得到的最优方案能较好的减少电压偏移,缩小电压波动范围,降低网损,从而改善电网整体性能。最优方案相比原方案增加了该电网在一年的 4 种运行方式中的无功补偿装置调节量,从而增加一定的成本。

3.2 高抗配置点母线电压的仿真计算

本研究对最优方案中高抗最终配置地点进行母线电压计算,可以得到 4 种运行方式下各高抗最终配置地点的母线电压标幺值(基准值为 330 kV)如表 4 所示。

表 4 高抗最终地点在 4 种运行方式下的母线电压

运行方式	方案	母线 A	母线 B	母线 C	母线 D	母线 E
冬大	原方案	1.010 4	1.007 0	1.013 4	1.021 8	1.025 6
冬大	最优方案	1.001 0	1.000 6	1.006 9	1.014 2	1.017 0
夏大	原方案	1.019 8	1.015 6	0.999 1	1.022 0	1.027 6
夏大	最优方案	1.009 8	1.002 6	0.992 9	1.020 1	1.025 5
冬小	原方案	1.040 1	1.038 6	1.047 6	1.030 0	1.028 0
冬小	最优方案	1.027 8	1.024 3	1.039 4	1.027 2	1.023 2
夏小	原方案	1.045 2	1.034 4	1.042 6	1.038 7	1.033 5
夏小	最优方案	1.033 3	1.020 2	1.035 8	1.029 1	1.028 2

由表 4 可知,原方案中这 5 个母线电压在 4 种运行方式中最高母线电压为额定电压的 +4.76%,最优方案中这 5 个母线电压在 4 种运行方式中母线电压在额定电压的 +4.00% 以内。可画出各运行方式下高抗最终配置地点母线电压如图 4、图 5 所示(图中数据为标幺值)。

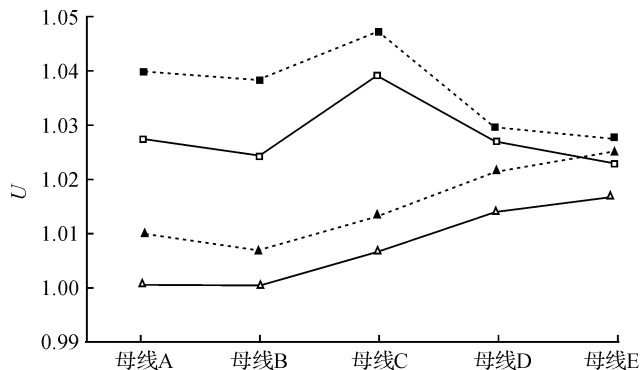


图 4 冬季大、小运行方式下高抗配置地点母线电压

▲ 冬大原方案 ▲ 冬大最优方案
 ■ 冬小原方案 ■ 冬小最优方案

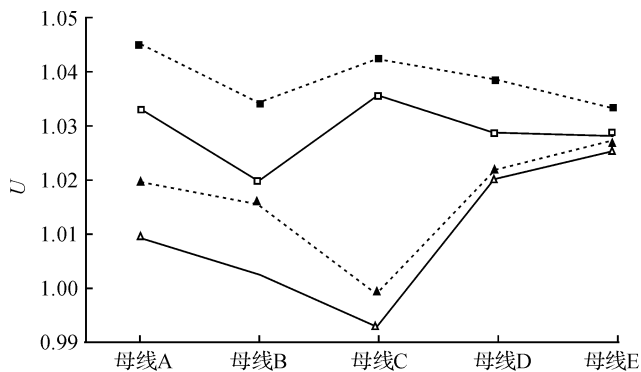


图5 夏季大、小运行方式下高抗配置地点母线电压

▲ 冬大原方案 ▲ 冬大最优方案
■ 冬小原方案 □ 冬小最优方案

从图4、图5可以看出,最优方案中高抗配置点母线电压在4种运行方式下均低于原方案,即更接近额定电压(除了母线C在夏大运行方式下其原方案和最优方案的电压值均低于额定电压)。此外可以看出,冬小、夏小运行方式下的母线电压普遍高于冬大、夏大运行方式,这是因为冬小、夏小运行方式中系统总负荷为最低,使得线路末端电压升压现象更为明显。而由图中也可以看出冬小、夏小运行方式下最优方案的高抗优化配置后对改善母线电压的作用也更加明显。

由此可见,采用当前高抗优化配置模型得到的最优方案能较好地改善高抗配置地点在各种运行方式下的母线电压,从而起到了无功调压的作用。

4 结束语

本研究建立了基于无功调压的高抗优化配置模型,在以电压指标为主的前提下,也综合考虑网损指标和无功动作指标,并采用层次分析法构建高抗优化配置指标体系。笔者对指标的赋权采用主、客观相结合的方式,其中主观的采用由标度扩展法构造判断矩阵的改进层次分析法,客观的采用熵权系数法。通过组合赋权使得赋权结果更为合理、符合实际。该种多目标优化的决策赋权方法可以用于其他问题的研究,具有普适意义。

实例证明,本研究建立的高抗优化配置模型能较好的改善高抗配置地点在各种运行方式下的母线电压,

从而起到了无功调压的作用;同时也能减少电压偏移,缩小电压波动范围,降低网损,从而改善电网整体性能。

参考文献(References):

- [1] 陈蒙伟,章坚民,徐谦,等.基于GPRS的配电网动态无功优化控制策略研究[J].机电工程,2013,30(2):228-231.
- [2] 周鑫,诸弘安,马爱军.基于多种群蚁群算法的多目标动态无功优化[J].电网技术,2012(7):231-236.
- [3] 张志刚,江渝,任静,等.基于均匀设计的免疫克隆算法在无功优化中的应用[J].电网技术,2012(5):232-238.
- [4] 黄弘扬,杨汾艳,徐政,等.基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功优化配置方法[J].电网技术,2012(2):88-94.
- [5] 禹化然,蒋伟毅,邱生.并网风电出力平稳控制方法综述[J].机电工程,2012,29(1):8-13.
- [6] 易强,周浩,计荣荣,等.交流特高压线路高抗补偿度下限的研究[J].电网技术,2011(8):18-25.
- [7] 齐锋光,高亮,邵玉槐.500kV高压线路并联电抗器补偿及仿真分析[J].上海电力学院学报,2005(4):303-306.
- [8] 丁心海,王先甲,黄涌,等.高低抗补偿调压机理比较及仿真分析[J].电力自动化设备,2010(2):63-66.
- [9] 电力工业部电力系统安全稳定导则[J].电网技术,1983(Z1):10-16.
- [10] 虞晓芬,傅玳.多指标综合评价方法综述[J].统计与决策,2004(11):119-121.
- [11] 叶珍.基于AHP的模糊综合评价方法研究及应用[D].广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2010.
- [12] 李娜娜,何正友.主客观权重相结合的电能质量综合评价[J].电网技术,2009(6):55-61.
- [13] MARTIN N F, ENGLAND J W. Mathematical theory of entropy[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [14] 贾正源,赵亮.基于熵权未确知测度模型的电能质量综合评价[J].电力系统保护与控制,2010(15):33-37.
- [15] LUO J, YANG S. Fuzzy risk assessment for information security based on method of entropy-weight coefficient[J]. Computer Technology and Development, 2009(10): 183-186, 194.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

汪莹,黄民翔,傅守强.基于无功调压的高压电抗器优化配置研究[J].机电工程,2015,32(5):696-701.

WANG Ying, HUANG Min-xiang, FU Shou-qiang. Optimal allocation of high voltage reactor based on voltage adjustment[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(5): 696-701.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>