

基于可靠性成本 - 效益分析的电网规划

何晓阳¹, 康庆平¹, 肖贵申²

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 河北省超高压公司, 河北 石家庄 050500)

摘要: 传统电网规划是以电网的直接投资费用最小为目标来满足一定可靠度的电网规划。电网规划的目的是保证电网的供电可靠性, 而没有考虑由于电网的扩展所产生的经济效益, 这样规划出的电网并不能获得最佳的社会效益。该文通过引入缺电成本, 将可靠性与经济性结合在一起, 在此基础上提出了一种新的电网规划成本 - 效益分析方法与数学模型, 该方法将缺电成本作为供电总成本的重要组成部分, 并且用缺电成本的大小来衡量可靠性效益的高低, 将规划的可靠性成本与可靠性效益统一在对电网的经济性评估上。对规划方案进行了分析和评价, 进一步完善了成本 - 效益分析方法在电网规划工程中的应用。最后, 通过实际系统算例说明了该方法的有效性。

关键词: 电网规划; 缺电成本; 可靠性; 经济性

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)10-0008-04

0 引言

电力体制改革后, 厂网分开, 电网公司和发电公司各自独立经营电网和电厂的建设, 电网的扩展不再按照电源的发展进行规划, 不再以能够把发电厂发出的电力送出去为目的, 而是以市场需求为导向, 按照负荷的增长扩展。因此, 电网规划不应脱离市场这个大环境。

在电力市场环境, 追求最大的经济效益是电力企业发展的宗旨。如何在日益激烈的市场竞争中获得较大的经济效益是电网规划应当首先考虑的问题, 这就要求供电方一方面保障供电的可靠性; 另一方面还必须兼顾公司的效益, 尽量降低成本。在市场环境下电力作为一种商品, 用户在购买电力的同时也购买了电力的一个重要的属性——供电可靠性, 如果由于供电可靠性得不到满足而使用户造成损失, 用户有权要求赔偿。因此, 在电力市场环境下电网规划的总成本不应当只包括电网的直接投资成本、运行成本, 还应当包括由于电力供应不足或中断而使用户造成的缺电损失, 也即需求侧的缺电成本, 这后一部分是供电可靠性水平高低的直接经济体现。

传统的电网规划是在满足一定运行条件下使电网投资最小为原则, 可靠性准则仅是确定性的“N-1”检验准则, 没有将供电可靠性问题有机地结合到电网规划的优化目标中去, 也没有考虑由于电网供电可靠性问题而造成的社会经济损失, 因此, 无法达到规划方案的经济性和可靠性的协调。

高可靠性与低投资成本是一对矛盾, 要解决这

一矛盾就需要通过可靠性成本 - 效益分析^[1,4]。

1 电网规划的数学模型

1.1 数学模型

本文提出的目标函数中包括电网的直接投资成本、网损和缺电成本。电网的直接投资成本可近似认为与线路长度成正比; 当按照经济电流密度选择导线截面时, 线路的功率损耗与线路的负荷矩成正比^[11]。在同一电压等级下, 所有线路的比例系数近似相同。数学表示形式为:

$$\min J = k_1 \sum_{i \in N_l} L_i + k_2 \sum_{i \in N} |P_i| / L_i + \sum_{i \in A_D} IEAR_i EENS_i \quad (1)$$

$$s \quad t \quad sp + g + r = d \quad (2)$$

$$p_{ij} - b_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (i - j) = 0 \quad (3)$$

$$|p_{ij}| (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{p}_{ij} \quad (4)$$

$$0 \quad g \quad \bar{g} \quad (5)$$

$$0 \quad r \quad d \quad (6)$$

$$0 \quad n_{ij} \quad \bar{n}_{ij} \quad (6)$$

式中: L_i 是线路 i 的长度; P_i 是线路 i 上的有功功率; N 表示电网所有线路的集合; N_l 表示电网中所有待选线路的集合; k_1 和 k_2 分别是由相应技术经济参数确定的比例系数。当线路的单位造价、投资回收期、设备折旧率、电价等参数确定后即可确定 (例如, 投资回收期 = 0.12, 折旧维修率 = 0.05, 电价 = 0.20/kWh 时, 对于 220 kV 电网 $k_1 = 20$ 万元/km; 若最大功率损耗时间 = 3 000 h, 经济电流密度 = 0.9 A/mm², 导线电阻率 = 31.5 mm²/km, 功率因数 =

0.9,则 $k_2 = 0.005$ 万元 $MW \cdot km^{-1}$)。S 为支路 - 节点关联矩阵; p 为支路功率; g 为节点发电机功率; d 为节点负荷; p_{ij} 为支路 $i-j$ 的功率; b_{ij}, n_{ij}^0, n_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的导纳、原有线路数和可增加的线路数; $\theta_{i,j}$ 为支路 $i-j$ 两端的相角; \bar{g}, \bar{p}_{ij} 分别为发电机的最大输出功率和支路 $i-j$ 的线路的最大功率, r 为减负荷量。 A_D 为负荷节点集合。 $IEAR_i$ 为缺电损失评价率,它定义为由于电网供电中断造成用户因得不到单位电量而引起的经济损失。 $EENS_i$ 为节点 i 的电量不足期望值,可通过可靠性计算得到。

1.2 模型特点

1) 目标函数中计及了系统投资费用和用户侧缺电损失成本,综合协调了供电方和用户方双方的利益,有效地将电网规划的经济性和可靠性结合起来。

2) 把可靠度水平作为变量处理,可靠度水平是在电网规划过程中分析成本与效益的不平衡中求得的最佳值,而不是任选的标准,克服了传统电网规划方法忽视供电可靠度的经济价值对用户侧影响的缺陷。

3) 该模型可以有效地包含只使系统投资费用最少的传统电网规划,模型具有一定的通用性和灵活性。

4) 具有多目标、非线性和整数性。

2 规划方案的成本-效益分析

成本-效益分析法主要是通过对标的物的成本、效益的分析与评价,以达到综合协调成本-效益之间的关系。电网可靠性成本可定义为供电部门为使电网达到一定供电可靠性水平而需增加的投资成本(也包括运行成本);可靠性效益可定义为因电网达到一定供电可靠性水平而使用户获得的效益。由于某一供电可靠性水平下的社会、经济效益较难估算,因此本文将可靠性效益用缺电成本,也即由于电力供给不足或中断引起用户缺电、停电而造成的经济损失来表示。

显然,在单位缺电成本不变的情况下,缺电成本越低,可靠性效益越高^[6]。这样,就可以把可靠性成本与可靠性效益统一在电网的经济性上衡量,它将给通过可靠性成本-效益分析进行电网规划带来方便。电网规划成本-效益分析曲线如图 1。

数学模型目标函数(1)可表示为:

$$TC = SC + OC \quad (8)$$

式中: TC 表示供电总成本; SC 表示系统投资费用(包括电网的直接投资成本和网损); OC 表示缺电

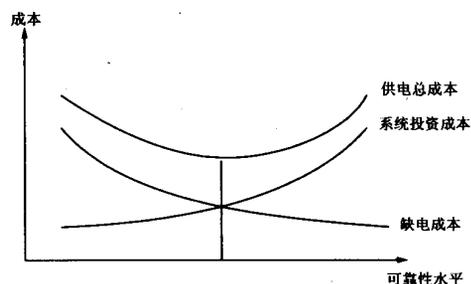


图 1 成本-效益分析曲线

Fig 1 Cost-benefit analysis curves

成本。为使供电总成本最少,社会效益最大,将式(8)对 SC 求导并使其为零:

$$\frac{\partial TC}{\partial SC} = \frac{\partial OC}{\partial SC} + 1 = 0 \quad (9)$$

即

$$-\frac{\partial OC}{\partial SC} = 1 \quad (10)$$

用增量形式表示为:

$$-OC = SC \quad (11)$$

由以上分析,当 $-OC > SC$ 时, $\frac{\partial TC}{\partial SC} < 0$, 系统投资费用的增加小于缺电成本的减少,此时可靠性水平的提高只需较少的系统投资费用,系统投资费用的增加能够获得收益;当 $-OC < SC$, $\frac{\partial TC}{\partial SC} > 0$, 系统投资费用的增加大于缺电成本的减少,此时系统可靠性水平的提高需要大量增加系统投资费用,增加的系统投资费用已不能获得收益,系统可靠性水平不宜再提高。只有当 $-OC = SC$ 时, $\frac{\partial TC}{\partial SC} = 0$, 系统投资费用的边际增加将完全为停电损失成本的边际减少所抵消,供电总成本达到最小。

$-OC = SC$ 是最理想、最完美的情况。但是,在实际中这种情况并不存在,即系统投资成本的增量与缺电成本的增量不会绝对相等。事实上,在满足一定可靠性水平的基础上,系统投资成本的增量总是大于缺电成本的增量。因此,电网规划的目的就在于如何最大限度地接近最理想的状态,而成本-效益分析方法的优点就在于用它进行网络规划可以得到最接近这种理想状态的电网结构,使得网络的可靠性和经济性达到合理的组合。

3 算例分析

在计算缺电成本时,由于 $IEAR_i$ 的计算^[2,3] 较为复杂(它与故障次数、故障类型、故障频率、故障

持续时间、负荷类型等有关,许多相关数据必须通过长期数据统计以及向用户调查才能得到^[9],因此,在能够说明问题的基础上,为了简化计算,本文中的两个算例在计算缺电成本时, $IEAR_i$ 采用文献 [5] 中 6 节点网络的各个节点 $IEAR_i$ 的综合值,该 6 节点网络的原始数据来源于文献 [10]。在文献 [2] 中对整个系统的 $IEAR$ 的计算方法进行了详细的介绍,这里不再赘述。在计算 $EENS_i$ 时,假定线路的故障停运率均为 0.02。

3.1 计算方法和过程

本文采用启发式方法中的倒推法,规划的过程是给定一个冗余的网络,首先用直流潮流模型求解网络的状态量(节点电压相角、支路功率),然后计算顺序去掉一条线路后缺电成本和总成本 J ,将 J 作为各待选线路的指标并由小到大排队。逐一将 J 最小的线路去掉,直到没有线路可以去掉为止,最后剩下的即为供电总成本最小的网络。计算过程的流程图如图 2 所示。

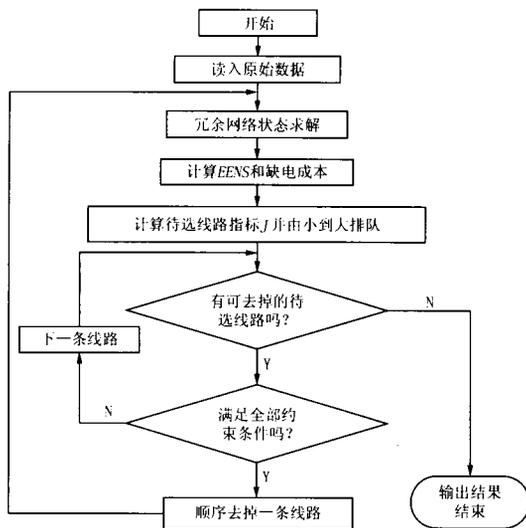


图 2 成本效益分析流程图

Fig 2 Flow chart of cost-benefit analysis

3.2 算例介绍及规划结果

算例 1

以文献 [7] 中 6 节点网络为例,该网络包含 2 个电源节点,4 个负荷节点,9 条支路。用传统的满足“ N ”和“ $N - 1$ ”检验的方法以及本文提出的成本-效益分析方法分别对网络进行规划,规划的网络结构如图 3~图 5 所示。

表 1 为 3 种方案规划的结果,其中方案 1 为满足“ N ”运行方式的规划结果;方案 2 为基于成本-效益分析的规划结果;方案 3 为满足“ $N - 1$ ”运行方

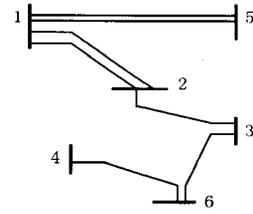


图 3 满足“ N ”运行方式的网络结构

Fig 3 Power network structure fitting for “ N ” operation

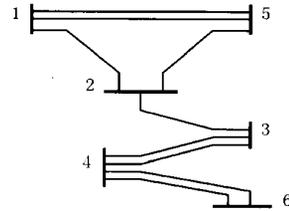


图 4 基于成本效益分析的网络结构

Fig 4 Power network structure based on cost-benefit analysis

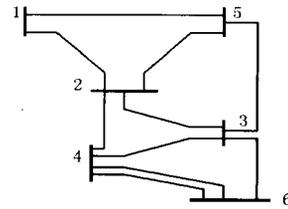


图 5 满足“ $N - 1$ ”运行方式的网络结构

Fig 5 Power network structure fitting for $N - 1$ operation

式的规划结果。

表 1 电网规划结果

Tab 1 Planning results of power network			
	系统投资 /万元	缺电成本 /万元	总成本 /万元
方案 1	6 800	669.76	7 469.76
方案 2	8 900	180.32	9 080.32
方案 3	11 900	0	11 900

算例 2

以文献 [8] 中例 6 - 1 为例。该网络有 18 个节点,27 条支路,7 个发电机节点,20 个负荷节点。分别用上述 3 种方法进行规划,结果如表 2。

表 2 网络规划结果

Tab 2 Planning results of power network			
	系统投资 /万元	缺电成本 /万元	总成本 /万元
方案 1	34 860	1 889.51	36 749.51
方案 2	36 180	1 692.92	37 872.92
方案 3	78 040	61.40	78 101.40

3.3 结果分析和比较

通过上述两个例子的规划结果可以看出在满足“ N ”运行方式时,网络的系统投资费用最低,缺电成

本最大,此时网络的供电可靠性最低。同时,因为网络的缺电成本很大,因此经济性不高;在满足“ $N-1$ ”运行方式时,网络的系统投资成本最大,缺电成本最小,此时网络的供电可靠性最高。但是,因为网络的系统投资成本很大,因此,网络的经济性不高。在算例 1 的方案 3 中,缺电成本为 0,说明此时网络中任何一条线路故障都不会引起系统过负荷,因此不会造成缺电);基于成本-效益分析的规划结果中,系统的缺电成本较小,因此此时网络的供电可靠性较高。同时,网络的系统投资成本也比较小,所以此时网络的供电可靠性和经济性都比较高。这样的网络结构是我们所希望的。从算例 1 的 3 种规划方法所得到的网络结构也可以看出方案 2 的网络结构从经济性和可靠性两方面综合考虑是最合理的。

4 结论

1) 电网规划必须综合考虑供电可靠性和网络的经济效益,将经济性和可靠性结合起来,才能适应电力市场环境下的电网规划的要求。

2) 成本-效益分析方法可以将电网规划的经济性和可靠性有效地结合在一起。

3) 成本-效益分析方法实现了灵活地分析和评价规划方案的经济性和可靠性,并能够正确反映投入资金与可靠度之间的确定关系,从而使电网规划的成本计算更为准确。

参考文献:

- [1] Neudorf E G, Logan D M, Kiguel D L. Cost-benefit Analysis of Power System Reliability: Two Utility Case Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1667-1673.
- [2] Billinton R, O teng-Adjei J. Utilization of Interrupted Energy Assessment Rates in Generation and Transmission System Planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 1245-1253.
- [3] Goel L, Billinton R. A Procedure for Evaluating Interrupted Energy Assessment Rates in an Overall Electric Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(4): 1396-1401.
- [4] Udo V, Agarwal S K, Vojdani A. Balancing Cost and Reliability: A Quantitative Study at Atlantic Electric[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1103-1107.
- [5] 张焰. 电网规划中的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 33-36
ZHANG Yan Research on Cost-benefit Analysis of Electric Power Network Reliability Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 33-36
- [6] 曹世光, 柳焯, 于尔铿. 缺电成本与可靠性规划的研究[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 52-54
CAO Shi-guang, LIU Zhuo, YU Er-keng Research on Outage Cost and Reliability Planning[J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 52-54
- [7] 康庆平, 庄丽晖. 一个实用的启发式电网优化规划方法[J]. 电网技术, 1993, 17(3): 51-55.
KANG Qing-ping, ZHUANG Li-hui Optimum Planning of Transmission Network: a Practical Heuristic Method[J]. Power System Technology, 1993, 17(3): 51-55.
- [8] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社, 1990
WANG Xi-fan Power System Optimizing Planning[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990
- [9] 曹世光, 杨以涵, 于尔铿. 缺电成本及其估计方法[J]. 电网技术, 1996, 20(11): 72-74
CAO Shi-guang, YANG Yi-han, YU Er-keng Power Outage Cost and Its Estimation[J]. Power System Technology, 1996, 20(11): 72-74.
- [10] 杨蔚百. 电力系统可靠性分析基础及应用[M]. 北京:水利电力出版社, 1986
YANG Shi-bai The Basis and Application of Reliability Analysis of Power System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1986
- [11] 杨毅刚. 电力系统优化的理论基础[M]. 北京:水利电力出版社, 1990
YANG Yi-gang Theoretical Basis of Power System Optimization[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990

收稿日期: 2004-09-07; 修回日期: 2004-10-12

作者简介:

何晓阳(1972-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: hexy2003@vip.sina.com
康庆平(1945-),男,副教授,长期从事电力系统优化规划方面的研究工作;
肖贵申(1968-),男,工程师,从事运行管理工作。

Power network planning based on reliability of cost-benefit analysis

HE Xiao-yang¹, KANG Qing-ping¹, XIAO Gui-shen²

(下转第 40 页 continued on page 40)

- quipment for 10 kV Power System in Substation[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 72-74.
- [7] 赵登福, 司喆, 杨靖, 等. 新型变电站电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 14-17.
ZHAO Deng-fu, SI Zhe, YANG Jing, et al Research of a New Integrated Control Set for Voltage and Reactive Power in Substation [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 14-17.
- [8] 苏建元, 王柏林, 洪佩孙. 变电站电压无功优化控制器[J]. 河海大学学报, 1998, 26(4): 107-110.
SU Jian-yuan, WANG Bo-lin, HONG Pei-sun Substation s V-Q Optimal Control Equipment[J]. Journal of Ho-

hai University, 1998, 26(4): 107-110.

收稿日期: 2004-09-15; 修回日期: 2004-10-31

作者简介:

阎振坤(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化和无功补偿; E-mail: yanzhenkun@yahoo.com.cn

厉吉文(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统电压无功优化和无功补偿的研究;

李晓华(1974-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化和无功补偿。

Study of voltage and reactive power integrative control strategy based on fuzzy boundary and double nine-area control method

YAN Zhen-kun, LI Ji-wen, LI Xiao-hua

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The basic principle of system voltage and reactive power integrative control is introduced. To improve the control capability of substation when high voltage is normal, the fuzzy boundary criterion of reactive power is adopted, and the control strategy based on the established mathematical model is obtained. By comparing with nine-subdivision criterion, the paper analyzes the characteristics of control strategy based on fuzzy boundary criterion of reactive power. When high voltage is abnormal, the strategy of double nine-area control can enhance stability of system voltage and safety of substation. The proposed integrative control strategy can reduce the time of tap-change control and voltage ripple. Compared with the result of traditional nine-area control, this integrative control strategy can increase the service life of tap changer, without reducing the efficiency of voltage and reactive power control.

Key words: high-voltage substation; voltage and reactive power integrative control; fuzzy boundary; nine-subdivision control method; double nine-area control method

(上接第 11 页 continued from page 11)

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Extra-high Voltage Corporation of Hebei Province, Shijiazhuang 050500, China)

Abstract: Traditional power network planning is to minimize the cost of the power network based on certain reliability. The purpose of the planning is to ensure power system reliability, so the benefit derived from the expansion of power network is ignored, thus the optimized social benefit can not be acquired. Through the introduction of outage cost combining the reliability and economy, a new mathematical model and cost-benefit analysis method of power network planning is presented in this paper. The method takes the outage cost as a part of the total cost and quantifies the reliability benefits by the outage cost, and the costs and benefits about power network reliability planning can be evaluated based on a consistence of economy. Through the analysis and evaluation of a planning for a concrete power system, the application of cost-benefit analysis in power network planning is further improved. The efficiency of this method is validated in some test examples.

Key words: power network planning; outage cost; reliability; economy

(上接第 24 页 continued from page 24)

3. Shanghai Cable Co., Shanghai 200070, China)

Abstract: A new method for accurate fault location is introduced, which uses fault record data from both terminals of the EHV cable line. Based on the characteristics of big distributed capacity at EHV cable line, the voltage and current distributions of EHV cable line are simulated with iterative calculation to improve the precision. Simulation results show that the method does not require data to be synchronized at both terminals of the line, or affect by system resistance or transient resistance and has no false-root identification problem, so it is easily to be realized. The simulation results show that this method has a higher precision and practical value.

Key words: EHV cable line; fault location; non-synchronization of two terminals