配电网节能潜力评估系统开发方案

张勇军，石 辉，许 亮
（华南理工大学电力学院，广东省绿色能源技术重点实验室，广东省广州市 510640）

摘要： 提出了配电网节能潜力定量评估的总体思路和具体实施方案，从抽样微观分析和全网宏观统计两方面入手，首先借助专用软件 PSAS 对所选线路分别计算 9 项优化措施的节能潜力，而后经匹配整合评估每条线路综合节能潜力；在对抽样线路进行节能潜力分级和全网特征类比处理后，通过比例加权得到全网节能潜力指标。所提出的评估体系既能够宏观掌握配电网的总体节能空间，又能直观评估各项节能措施在具体线路中的节能效果。该评估体系模块已嵌入 PSAS 软件并成功应用于广东多地配电网的节能分析。

关键词： 节能潜力；评估体系；节能改造；配电网

0 引言

电力行业是节能减排的重点领域，电网作为主要环节之一，相关的节能研究近年得到长足发展。对配电网而言，准确评估其节能潜力是科学地开展配电网节能改造工作的前提，也是指导配电网节能规划、运行的理论基础和根本依据[1-2]。

当前对电力行业节能减排潜力评估的研究多侧重于电源侧或宏观大电网方面[3-5]。文献[4]借鉴环境学习曲线变化规律，评估了中国电力工业在不同时段的节能减排潜力；文献[5]通过历史纵向、国内外横向比较，得出了全国电网近期可望实现的总体降损潜力。

相比之下，针对配电网进行系统化节能潜力评估的研究则鲜见报道，多数是针对某个具体手段的节能潜力评估。文献[6]评估了欧盟国家改用新型节能配电变压器（简称配变）的电网预期节能空间；文献[7]对东莞长安配电网若干典型配电线路进行了 5 个技术手段的分项节能潜力评估，提出了配电网微观节能潜力评估的方法；文献[8]分析了电网线损的分压、分元件构成，提出了相应的节能对策；文献[9]对配电网各类元件的损耗进行了定量探索；文献[10]通过建模确定了配电网线路、变压器的最优配置和经济运行区域；文献[11]提出了配电网节能运行电压的选取原则；文献[12]解耦分析了功率因数、供电量等变化对线损的影响，进而通过神经网络模型预测线损发展。上述研究实现了配电网线损解耦和量化，并有所侧重地探索了节能目标和实现手段，但尚未形成节能潜力评估的系统理念和思路；基于线损分析的节能评估和传统规划方法能够从整体上掌握配电网的节能空间，但难以获得不同降损措施的节能效果，无法体现各项节能措施的效益差别，对节能改造和规划欠缺具体化的指导意义。

本文建立了配电网节能潜力评估的系统框架，并开发了配电网节能潜力评估计算软件 PSAS，通过从微观到宏观的系统方法定量评估配电网各种手段的节能降耗空间，以辅助配电网节能改造与规划方案的编制。

1 总体思路

配电网能耗是多种因素综合作用的结果[8-9]，如式(1)所示，节能降耗需要针对各因素分别优化。

$$\begin{cases} P_{\text{loss}}(t) = \dfrac{P^2(t)+Q^2(t)}{V^2(t)}R \\ A_{\text{loss}} = \displaystyle\int_0^T P_{\text{loss}}(t)\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{1}$$

式中：$P_{\text{loss}}(t)$，A_{loss} 分别为线损功率及电量；$P(t)$，$Q(t)$ 分别为配电线路传输的有功功率和无功功率；$V(t)$ 为线路电压；R 为等值电阻；T 为计量周期。

现行的配电网节能技术主要涉及线路和变压器改造、无功优化、负荷调整、负荷波动抑制以及运行参数控制等[1]，每一类技术在不同配电网中能起到的降损效果不同，全部节能技术总的预期降损效果即被视为综合节能潜力。

进行地区配电网综合节能潜力评估，首先将全网抽象成若干类不同负荷特点和拓扑特点的配电线路，然后选择若干条代表性典型配电线路，采用配电网节能降耗改造优化计算与分析（PSAS）软件逐一进行系统化节能潜力评估，最终根据微观线路评估结果与该类型线路在电网中的比重来定量评估地区

收稿日期：2010-06-17；修回日期：2010-11-09。

配电网的综合节能潜力。该评估体系的总体思路框架如图1所示。

图1　节能潜力评估体系

Fig. 1　Process of energy-saving potential evaluation

结合线路运行环境，分别定量计算以下措施的降损效果：中压线路截面更换及无功补偿的降损改造、优化无功控制策略、调整母线电压、减小供电半径、架空线绝缘化改造、更换高损配变、减小日负荷波动、调整三相不平衡状况等。如图2所示。

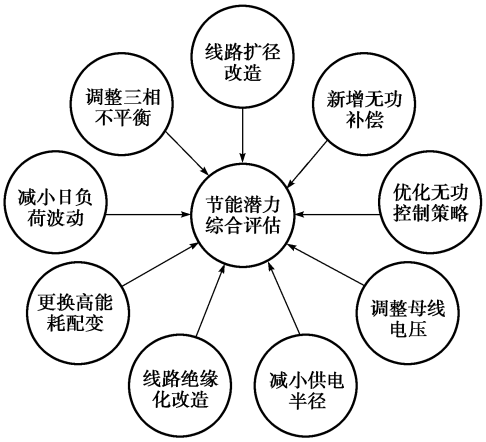

图2　配电网节能潜力评估架构

Fig. 2　Structure of energy-saving potential evaluation of distribution systems

以此为依据，综合上述设备改造及可行的运行调整措施，评估预期可以实现的理论最大降损幅度以及工程最大降损幅度，以作为配电网改造的参考。最后根据各类配电线路在该地区的比重，进一步评估全地区配电网的综合节能潜力。

2　评估体系

2.1　能耗现状调研

针对较大规模配电网的节能潜力评估，首先需要摸清配电网能耗现状。面对成千上万条配电线路，逐条计算显然不现实也不必要，因此，需要通过调研选取若干典型线路，在此基础上分析典型线路各项能耗，并制定可行的节能对策。

出于全网评估的需要，调研应根据负载电流、供电半径、装接配变总量、线路结构、电缆化水平等指标在全网抽取覆盖各指标范围的样本线路。为保证评估结果的可靠性，要求必须包括典型高损耗线路，并适当提高劣指标线路所占比例。调研的参数主要包括中压线路型号/长度、配变型号/数量、无功补偿比例、日负荷波动特征，以及年最大负荷时母线电压、负荷电流、功率因数等。

通过PSAS软件分析线路能耗，对该线路进行年最大负荷日潮流计算，可得到每段线路、每台配变的有功损耗和无功损耗，以及全线最低电压、日线损、网损费用等。通过分析，明确各部分的损耗水平以及改造空间，制定可行的节能措施。

2.2　分项节能潜力评估

以对应的节能改造和优化为基础，在典型方式下进行分项潜力评估，分列如下。

1)优化无功控制策略的节能潜力。假设中压馈线通过无功补偿使负荷功率因数达到0.95～0.99，以此调整相应的无功负荷来计算预期网损，并与现状网损相比较，可评估该项措施节能潜力。

2)调整母线电压的节能潜力。对于供电半径较大、负荷较重、可变损耗占线损比例较高的线路，适当提高母线电压至10.6 kV；反之，对于轻载、以固定损耗为主的线路，适当降低母线电压至10.0 kV。通过电压调整前后线路的潮流分析及损耗对比，可评估该项措施的节能潜力。

3)改变导线型号/线径的节能潜力。考虑地区负荷增长以及改造工期，按照经济电流截面选取导则，选取相应型号/线径的新型高性能绝缘导线替换原来各分段、分支导线(铺设方式不变)。对比改造前后的全线总损耗，可得相应的节能潜力。

4)减小中压线路供电半径/路径的节能潜力。对于供电半径偏大的线路，假设靠近该线路负荷中心附近1～2 km处已建成新变电站或开关站，同时考虑全线负荷增长。根据经济电流截面选取导则选取新型电缆，以最短路径连接新电源点和负荷中心，取代原主干馈线。对比相同负荷下新旧线路供电总损耗，可得相应的节能潜力。

5)更换高能耗配变的节能潜力。在计及负荷增长的前提下，假定将全线S9及其以下系列的配变(高损变)全部更换为同容量的S13或SH15系列配变。对比更换前后全线损耗，评估相应的节能空间。

6)减小日负荷波动的节能潜力。假定通过峰谷电价等需求侧管理措施能有效实现线路负荷削峰填谷，而总供电量保持不变。在现状线路参数、负荷及其波动情况下，考虑最理想模式和可预期模式2种

模式的日负荷调整来评估减小日负荷波动的节能潜力。

7)调整三相不平衡的节能潜力。调查统计中压、低压馈线的三相不平衡度,假定通过负荷调整可使三相不平衡度达到一个可接受的理想水平,对比调整前后的线路损耗差,即为相应的节能潜力。

8)新增无功补偿的节能潜力。考虑负荷增长因素,同时保持电压、无功控制策略等不变,通过软件进行不设限的新增无功补偿优化,对比优化前后的线路损耗差,可得其节能潜力,并评估其成本效益比。

9)其他。对于线路接线方式调整、谐波控制、负荷分布调整等措施的节能潜力,限于参数计量及相应的节能优化技术,目前只能针对理想预设进行粗略的节能潜力评估。

在评估出各种降损措施的节能空间后,可以结合成本效益分析,给出各项降损措施的降损效果评级、实施难度评级和综合性能评级,以指导配电线路的节能改造计划。

2.3 综合潜力分析

上述分项评估用来考察单一优化措施的节能潜力,各项措施在技术上是可行的,可单独实施也可同时推进。借助 PSAS 软件,优化无功控制策略、调整母线电压以及改变导线型号/线径等 3 项措施可通过结合导线更换与无功优化的配电网节能规划模块协同实现,其他评估项也有相应的计算模块。综合潜力分析以此为基础,考察全部措施同时采用时所能带来的节能效果。

对单条中压馈线,设上述 9 项措施节能潜力即预期网损下降幅度依次为 α_i($0\leqslant\alpha_i<1$,$1\leqslant i\leqslant 9$),则全线综合节能潜力为

$$\alpha_{\Sigma}=\left[1-\prod_{i}(1-\alpha_i)\right]\zeta \tag{2}$$

式中:ζ 为折扣系数,用于剔除多种措施综合作用所导致的节能效果重叠部分,根据工程经验,ζ 一般取 0.7~0.9,具体取值根据电网实际特点和参数优化水平而定。

将所选线路依全线综合节能潜力大小分为较大、一般、较小 3 类,取同类中压馈线的综合节能潜力平均值 $\bar{\alpha}_{\Sigma k}$ 代表全网中该类馈线的节能潜力,结合各类馈线在全网中所占比例 β_k,加权组合可得全网预期的综合降损潜力 α_{net}:

$$\alpha_{\text{net}}=\sum_{k=1}^{3}\bar{\alpha}_{\Sigma k}\beta_k \tag{3}$$

借助分析结果,还可判断各类优化措施的需求分布和效益排序,得出全网实施各种措施的降损效果评级、实施难度评级和综合性能评级,从而指导配电网进行相应的规划、改造及运行优化。

3 评估计算软件

为实现上述评估体系,本课题组开发了 PSAS 软件。PSAS 在电网潮流计算的基础上,扩展了基于灾变遗传算法[13]的无功补偿和导线更换综合节能优化模块,同时具备配电网拓扑结构校验、三相不平衡损耗计算、配变优化配置、线路日线损评估、多种节能改造效益分析等功能[1],如表 1 所示。

表 1 PSAS 软件主要模块及其功能
Tab. 1 Main modules and functions of PSAS software

模块	功能
基础数据库模块	基础数据录入,用于配电网计算
拓扑检查模块	进行网络拓扑结构分析和检查
潮流计算模块	计算给定参数下的配电网潮流,给出各元件损耗分析
无功补偿和导线更换综合节能优化模块	进行无功补偿优化及导线更换综合优化计算与效益分析
三相不平衡计算模块	计算中压、低压线路三相不平衡损耗、分布及其经济代价
配变优化规划模块	对已有配变进行容量、型号优化及负荷调控建议
日负荷波动优化模块	计算典型负荷波动特性下线路日线损及其减小波动度的降损效果

软件的输入数据库包括以下数据表:节点数据表、馈线首端(母线)数据信息表、线路数据表、配变数据表、负荷数据表、无功补偿装置数据表、导线参数表、变压器参数表。

软件的输出数据库包括以下数据表:支路初始潮流数据表、支路优化潮流数据表、节点初始潮流数据表、节点优化潮流数据表、馈线首端优化前后对比表、无功补偿优化规划结果表、导线优化规划结果表、节能降耗综合效益表。

为满足计算速度和精度要求,采用执行速度较快的 Visual C++作为开发语言,软件部分界面见附录 A 图 A1、图 A2。

4 算例

以广东某市中压配电网为分析对象,其中分区 A 为典型的乡镇配电网,分区 B 代表城区配电网。从 A,B 分区分别选取 11 条、7 条代表线路,抽样比例均为 15%左右,样本基本覆盖了所在分区配电网的特征参数范围。以当前年最大负荷日参数为基础进行分析,首先计算出各代表线路实施各分项节能措施的降损潜力和估算相应的改造成本,然后考虑 ζ 取 0.8,计算得到各线路的综合节能潜力,如表 2 所示。

表 2　典型线路节能潜力
Tab. 2　Energy-saving potential of typical feeders

分区	线路编号	馈线电流/A	配变负载率/%	网损率/%	综合节能潜力/%
A	A-1	316	40～65	4.59	65
	A-2	283	40～60	3.17	33
	A-3	380	75～95	1.70	11
	A-4	329	50～100	3.37	75
	A-5	349	50～80	3.72	78
	A-6	360	45～65	4.22	53
	A-7	353	40～60	1.85	30
	A-8	367	50～70	2.11	30
	A-9	331	35～55	3.89	60
	A-10	319	40～70	4.92	55
	A-11	348	30～60	2.45	30
B	B-1	317	20～40	1.32	15
	B-2	206	30～50	1.88	23
	B-3	256	20～40	1.54	3
	B-4	381	30～60	1.99	11
	B-5	299	60～90	1.39	5
	B-6	429	60～90	1.53	5
	B-7	261	20～40	2.07	4

进一步对所选线路分类评价，并评估所在分区配电网的综合节能潜力，如表 3 所示。

表 3　A，B 分区节能潜力及特征评价
Tab. 3　Evaluation of energy saving potential and characteristics of division A and B

分区	节能潜力评价	典型线路数	平均节能潜力/%	全区同类线路数	全区综合节能潜力/%
A	较大	3	73	8	40.3
	一般	3	56	18	
	较小	5	27	41	
B	较大	1	23	8	9.5
	一般	2	13	13	
	较小	4	4	28	

由表 3 数据可知：A 区配电网有较大的降损空间，线路节能潜力高达 78%，由各线路的微观评估结果可知，节能点主要在于提高线路电缆化率、减小供电半径、改造“卡脖子”架空线路等；B 区配电网也有近 10%的节能空间，原因在于电缆化率普遍较高，节能点主要在于解决部分线路“卡脖子”、负荷重且分散的问题。

5　结语

电网节能潜力评估是实现电网能耗管理不可或缺的一环，也是指导电网节能改造及发展规划的重要工具。本评估体系以抽样分析和系统归纳为组织架构，具备理论与实际相结合、现状与规划相结合、定性与定量相结合、微观（改造）与宏观（规划）相结合等特点，能灵活应用于配电网节能潜力分析，算例以及在广东多个地区配电网节能改造与规划中的应用表明评估结论准确合理。

尽管综合节能潜力的精度在一定程度上受经验值 ζ 影响，但是作为宏观评估而言是可以接受的。重要的是，本评估体系有如下重要的优点：

1）灵活：可根据需要选择单项或多项措施的节能潜力评估，既可以得到微观上各配电线路实施不同措施的节能潜力、成本效益与可操作性评估，又可以获得区域范围的总体节能空间。

2）优化：基于优化模型的 PSAS 软件以及成本效益对比的评价方法可体现工程改造与规划最优化的需求。

3）指导性强：基于配电网节能潜力评估及其软件的计算结果，可以为各地区配电网制定无功补偿、导线更换、节能改造项目库、节能规划、节能运行、节能管理等方案提供理论依据，推动配电网节能建设高效运行和可持续发展。

附录见本刊网络版（http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx）。

参考文献

[1] 张勇军，钟清，陈旭，等. 配电网节能规划与运行[M]. 北京：中国电力出版社，2009.

[2] DANIEL L C, KHAN I H, RAVICHANDRAN S. Distribution network reconfiguration for loss reduction using ant colony system algorithm[C]// Proceedings of the 2005 Annual IEEE India Conference, December 11-13, 2005, Chennai, India: 619-622.

[3] 尚金成. 电力节能减排的理论体系与技术支撑体系[J]. 电力系统自动化，2009，33(6)：31-35.
SHANG Jincheng. Theoretical system and technical supporting system for energy-saving and emission-reducing of electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 31-35.

[4] 张旭，孙根年. 中国电力工业的环境学习曲线与节能减排潜力分析[J]. 华北电力大学学报：社会科学版，2008(2)：1-7.
ZHANG Xu, SUN Gennian. A study on the environment learning curve and energy saving resources and emission reduction potential of power industry in China[J]. Journal of North China Electric Power University: Social Sciences, 2008(2): 1-7.

[5] 中节蓝天投资咨询管理有限责任公司. 中国电力行业能效现状及节能潜力分析[J]. 电力设备，2005(6)：109-111.
CECIC Blue Sky. Status of Chinese power industry energy efficiency and energy saving potentials[J]. Electrical Equipment, 2005(6): 109-111.

[6] de KEULENAER H, CHAPMAN D, FASSBINDER S. The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers[C]// Proceedings of the 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Part 1: Contributions: Vol 4, June

18-21, 2001, Amsterdam, Netherlands.

[7] 李鹏,张勇军,谭伟聪,等.长安配网节能降耗潜力评估研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(14):97-100,104.
LI Peng, ZHANG Yongjun, TAN Weicong, et al. Study on energy saving potential assessment for Chang'an distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 97-100, 104.

[8] 余卫国,熊幼京,周新风,等.电力网技术线损分析及降损对策[J].电网技术,2006,30(18):54-57,63.
YU Weiguo, XIONG Youjing, ZHOU Xinfeng, et al. Analysis on technical line losses of power grids and countermeasures to reduce line losses[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 54-57, 63.

[9] 王浩锐.配电网理论线损计算方法及降损措施研究[D].北京:华北电力大学,2008.

[10] 卢志刚,秦四娟,李海涛,等.配电网技术线损分析[J].电力系统保护与控制,2009,37(24):177-180.
LU Zhigang, QIN Sijuan, LI Haitao, et al. Analysis on technical line loss of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 177-180.

[11] 贺先豪,彭建春,龚演平.配电网降低线损的误区研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(1):96-99.
HE Xianhao, PENG Jianchun, GONG Yanping. Research on the misunderstandings on reducing line losses of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 96-99.

[12] 田宏杰.线损分析预测在供电管理中的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(7):77-80.
TIAN Hongjie. Application of line loss analyzing forecast in power supply management[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 77-80.

[13] 张勇军,任震,钟红梅,等.基于灾变遗传算法的无功规划优化[J].电力系统自动化,2002,26(23):29-32.
ZHANG Yongjun, REN Zhen, ZHONG Hongmei, et al. Cataclysmic genetic algorithms based optimal reactive power planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 29-32.

张勇军(1973—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力系统无功优化和电压稳定、电力系统可靠性与规划。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

石 辉(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行分析与控制。E-mail: 357970809@qq.com

许 亮(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行分析与控制。

Systematic Developing Program of Distribution Network Energy Saving Potential Evaluation

ZHANG Yongjun, SHI Hui, XU Liang

(South China University of Technology, Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The general idea of quantitative evaluation of distribution network energy saving potential is proposed, and specific implementation schemes and PSAS software are described. The energy saving potential evaluation consists in its microscopic analysis of samples and macro statistics of the whole network. First of all, by means of the special software PSAS, the energy saving potential of each of the nine optimization measures is calculated independently for the lines selected followed by an assessment of the comprehensive energy saving potential of each line using matching integration. After energy saving potential classification and analog processing of the characteristics of the whole network for the sampled lines, the energy saving potential of the whole network is obtained through weighted proportion. The evaluation system proposed can not only access the overall energy-saving space of distribution network, but also intuitively evaluate the energy saving effect of various measures in specific feeders. Of fairly high engineering value for macro plan development and micro reform formulation, the evaluation system is successfully applied to distribution systems in Guangdong for energy-saving potential analysis.

Key words: energy saving potential; evaluation system; energy saving reconstruction; distribution network

附录 A

本文计算所采用的 PSAS 软件，部分主界面如图 A1、图 A2 所示。

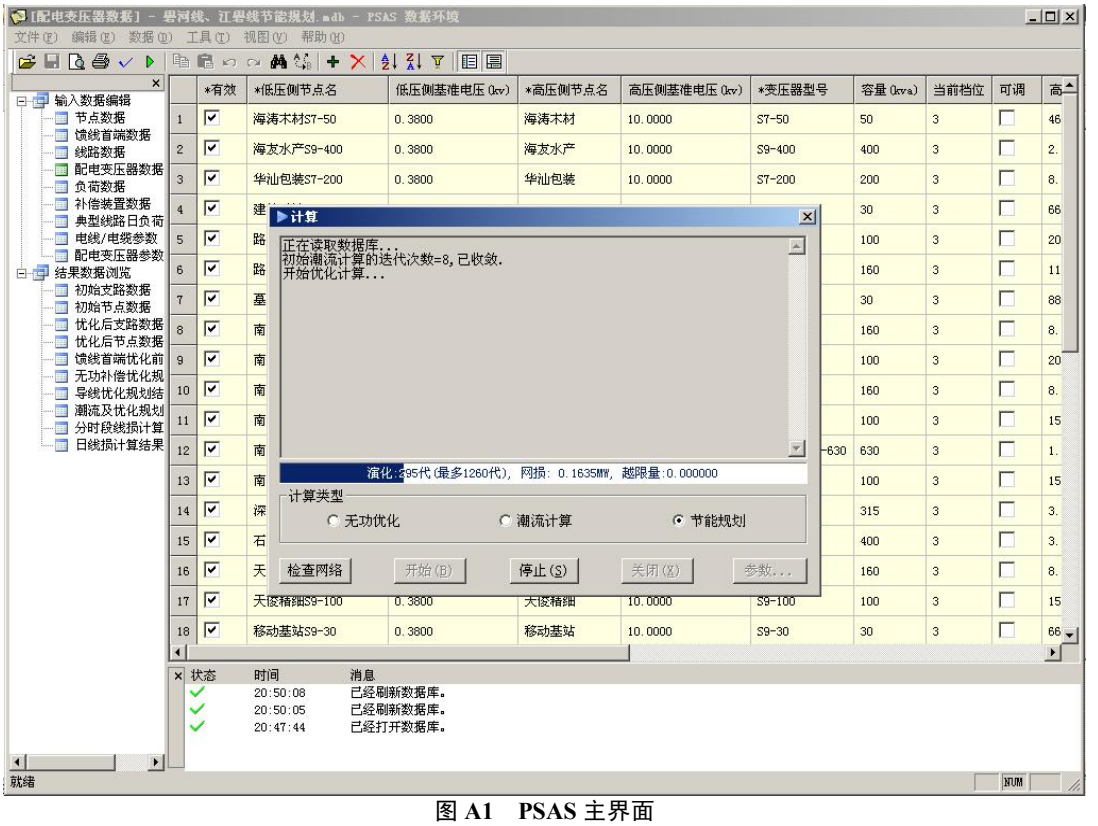

图 A1　PSAS 主界面

Fig.A1　Main interface of PSAS

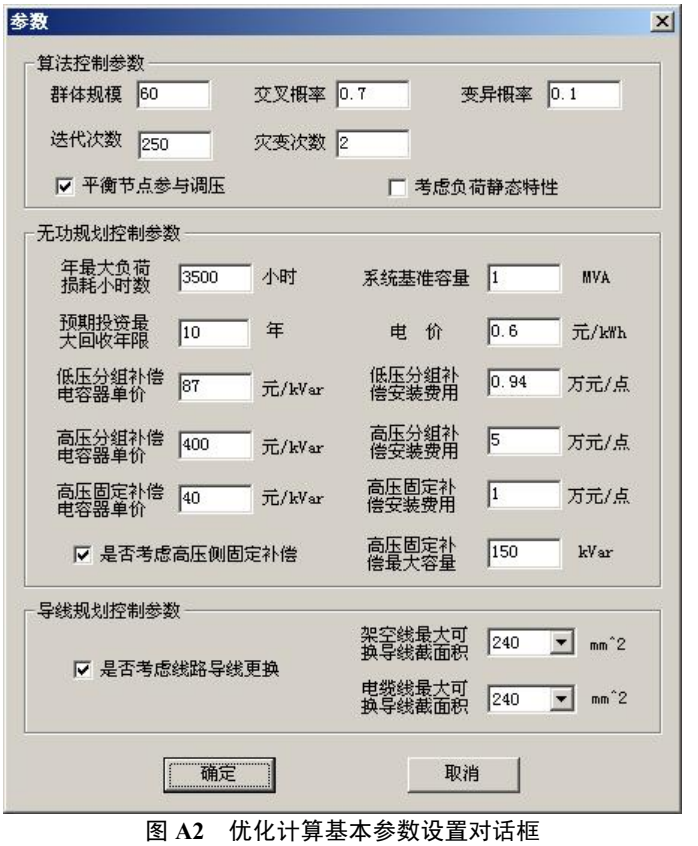

图 A2　优化计算基本参数设置对话框

Fig.A2　Basic parameters setting box of optimization