

[电网规划]

基于主配网协同的电网规划方法研究

文/海南电网规划设计研究中心 宁光涛 陈明帆 李琳玮 邱剑洪
北京清软创新科技股份有限公司 张志伟

首先建立电网规划成本模型，然后建立包含网损模型和线路约束关系的主配网协同电网规划方案，最终结合线路网损模型和线路约束模型计算电网规划方案的成本，并与两种传统建设方案的规划成本进行比较。算例表明，本规划方案比传统方案更加经济、可靠性更高。

近年来，新能源快速发展并且不断接入电网，导致电网架构日益复杂且主配网呈现出一定不协调。主配网不协调会破坏电网整体的稳定运行以及电网内部电源的运行，甚至会造成局部区域的瘫痪。因此合理地设计电网架构在提高系统稳定性、降低系统运行成本、减轻系统碳排放、保证系统电源安全稳定出力以及提升区域内新能源的消纳能力和稳定运行能力等方面具有重要意义。

国内外在智能电网规划方面进行了诸多研究，但随着智能电网的不断发展，仍然存在着诸多问题，目前我国智能电网规划中主要存在以下问题：在电网规划模型中主配网的协同规划不协调、不匹配的问题日益凸显；目前实际电网规划中考虑电网网损方面较少，网损的计算十分复杂，而且电网网损和线路规划有密切关系；在实际的电网输电线路建设中，待建线路之间并不是相互独立的，存在约束关系，目前研究中考虑线路约束关系较少。针对以上智能电网规划中存在的问题，本文对网损和线路建设约束分别进行建模，并将之嵌入到传统的电网规划模型中，构建考虑网损与线路建设约束的电网规划模型，并结合电网成本模型进行经济可靠的规划。本文的规

划优化模型会将模型与所规划的时间内每一年不同的场景下系统的运行模型相结合，根据场景模拟考虑系统运行的边界问题，同时综合考虑了电网规划建设成本、运行成本等相关因素，保证规划结果可行可靠。

规划成本目标函数

规划模型不仅要考虑电网的稳定运行，而且要考虑规划的经济性，因此需要建立成本计算模型，即成本目标函数。规划成本主要分为两部分：一部分为前期的系统投资成本，一部分为后期运行成本，设系统投资成本为 C_1 ，运行成本为 C_2 。

1. 系统投资成本

系统投资成本不仅包括规划周期内的投资成本，还会影响下个周期的投资成本。系统投资成本主要为电网规划线路建设的成本，因此投资成本会随线路的改动而变动，属于规划期内的动态成本，对应的表达方式为

$$C_1 = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{i-j} n_{i-j} \quad (1)$$

式中， C_1 表示投资成本现值； Ω 表示待选线路集，选择的线路集不同，会直接影响线路数量级， C_{i-j} 表示节点 i 和 j 之间每条输电线路造价的现

基金项目：海南电网有限责任公司科技项目（070000KK52190003）

值,这里不同的线路有不同的现值; n_{i-j} 表示节点*i*和*j*之间规划新建输电线路的数量,与现值相互对应。

系统的投资属于动态成本,与线路的规划有直接关系,线路合理规划不仅对现有规划投资成本有影响,同时也会产生残值,影响下一期电网规划投资成本。

2. 运行成本分析

电网规划方案不同会造成规划线路不同,而为电网系统功率传输提供不同的选择,因此需要在规划方案时考虑系统内所有的影响因素,例如发电机的运行经济参数、线路的参数及潮流分布和流向等。

系统发电成本与电网各个发电机组的有功功率有直接关系,可以用有功输出的二次曲线之和的形式表示,表示方式为

$$C_2 = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (2)$$

式中, C_2 是系统的发电成本; N_g 是系统中的发电机数量,发电机数量与最终的运行成本存在线性关系; a_i 、 b_i 、 c_i 是发电机*i*的运行经济参数,参数的不同会影响发电机的运行方式,所产生的经济性也会不同; P_{Gi} 表示发电机*i*的有功出力值。

计算发电机的出力曲线时需要使用下面建立的最优直流潮流模型,然后根据出力曲线将系统的运行成本折为现值,从而将规划周期内的系统运行成本量化分析,进行系统成本的现值折算,表达式为

$$\min C' = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} (a_i P_{Gi,t}^2 + b_i P_{Gi,t} + c_i) h_{i,t} (1+\sigma)^{-t} \quad (3)$$

式中, C' 表示规划周期内系统运行总成本的折算后的现值,与 C_2 有着直接关系; $P_{Gi,t}$ 表示发电机*i*在第*t*年的典型有功出力值,随着发电机的投运时间,发电的典型出力是不同的; $h_{i,t}$ 表示发电机*i*在第*t*年的投运时间(小时数),发电机的投运时间直接影响发电机的有功曲线,从而影响系统的总运行成本的现值; σ 是银行年利率。

电网规划模型

模型针对主配网待建线路,在目标规划时间范围内的每一年都建立投建状态变量,同时由于每次的规划方案都会对下一期有影响,因此此次同时在规划模型末尾增加了整个周期内每次会建立待建线路的建设状态变量以及依此建立的耦合

约束关系,结合前面的规划模型组成整个周期的投资决策模型。

在每一年的约束模块中,为了精确详细地描述电网运行的电力电量流动与平衡过程,在多年内选取不同的负荷场景(每个负荷场景要有明显的区别)。针对选择的每个负荷场景建立系统负荷平衡约束模型、发电机组出力约束模型和线路潮流约束模型等,然后将所有的约束模型与该年待建线路的投建状态变量之间建立耦合关系。

在构建电网模型规划过程中,本文为解决目前电网规划中存在的问题建立了网损模型和线路建设约束模型,以达到电网能够安全经济运行的目标。

1. 基于直流潮流的网损模型

网损是指电能在线路传输或者设备之间传输过程中以热能形式损失的功率,一般为电阻或者电抗消耗的功率。

网损是指电力在从发电厂送到用户的过程中,在主干网络中所引起的电能损耗。电能损耗一般通过功率损耗来计算。在电网的运行管理过程中,网损是非常重要的组成部分,网损大小不但能够体现电网的组织分配结构是否合理,同时也能反映出电网企业的整体水平,因此本文根据网损特点以及网损与线路潮流之间的关系,建立基于直流潮流的网损模型,模型如图1所示。

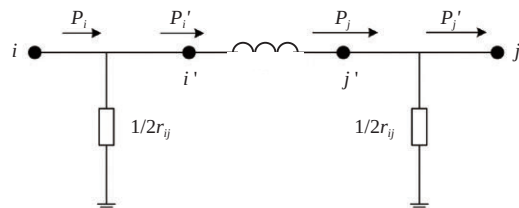


图1 网损等值模型

根据交流潮流公式推导直流潮流模型下系统网损的计算方法,设线路始端为线路端点*i*,终点为线路端点*j*,线路首末端传输的有功功率计算公式为

$$f_{i(j)} = V_i^2 V_j \left[g_l \cos(\theta_i - \theta_j) + b_l \sin(\theta_i - \theta_j) \right] \quad (4)$$

$$f_{i(j)} = V_j^2 V_i \left[g_l \cos(\theta_j - \theta_i) + b_l \sin(\theta_j - \theta_i) \right] \quad (5)$$

式中, $f_{i(j)}$ 和 $f_{j(i)}$ 分别为线路*l*的首末两端*i*、*j*的有功功率, V_i 、 V_j 分别是节点*i*和节点*j*的电压幅值, θ_i 、 θ_j 分别是节点*i*和节点*j*的电压相角, g_l 与 b_l 为线路*l*的电导与电纳。

当电网正常运行时在简化模型中一般简化为 $V_i \approx V_j \approx 1.0$, $\sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij}$, $\cos \theta_{ij} \approx 1$ 。

线路 l 上的损耗为

$$E_l = f_{l(i)} + f_{l(j)} \\ = V_i^2 + V_j^2 g_l - 2V_i V_j g_l \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (6)$$

其中已知的是线路电阻 r_l 与电抗 x_l ，注意到公式(5)依然是一个非线性表达式，式中非线性主要来源于电压幅值与相角差的乘积项，然而在正常电网运行情况下，节点 i, j 的电压的幅值都接近1.0，而且线路两端的电压相位角的相位差很小。根据泰勒公式可整理公式(6)，线路 l 上的损耗可以近似表示为

$$E_l = (V_i^2 + V_j^2) g_l - 2V_i V_j g_l (1 - 0.5(\theta_i - \theta_j)^2) \\ = g_l (V_i - V_j)^2 + g_l V_i V_j (\theta_i - \theta_j)^2 \\ = \frac{r_l}{r_l^2 + x_l^2} (\theta_i - \theta_j)^2 \quad (7)$$

式(7)表明，电路的电导与线路节点电压相位差的平方的乘积值与线路网损极为接近，此种现象和电力系统有功功率于节点电压的相位差有关、无功功率与节点电压幅值强相关的解耦特性相符。需要注意的是，式(7)计算中电阻电抗均需要使用标么值进行计算，计算的网损结果也为标么值。实际计算中给出线路电阻 r_l 与电抗 x_l 的有名值，系统电压基值采用各选电压法选定设为 U_b ，系统功率基值为 P_b ，则网损值为

$$E_l = \frac{r_l}{r_l^2 + x_l^2} (\theta_i - \theta_j)^2 U_b^2 \quad (8)$$

基于直流潮流的网损模型实现了支路潮流方程中原本相互耦合的线性项与非线性项、支路功率与网损功率、电压幅值与相角的解耦，数学表达清晰明确，推导过程中仅使用两条合理的假设条件，计算网损更加准确。

根据待建线路网损和已建线路网损，合理规划线路，能够使电网运行成本减小，满足电网的经济运行要求。在主配网规划区域内如果含有DG，DG的具体选址和容量不合理都可能会使线路网损增加，从而导致线路过载，因此本文在进行电网规划时默认DG选择合理。虽然线路网损不能彻底消除，但可以将网损降低到最低水平，另外降低线路网损对于保护线路、减小电压降、改善电压水平等有积极的作用，并带来其他环境效益和经济效益。

2. 线路约束模型

在实际的线路规划建设方案中，待建线路之间并不是相互独立的关系，存在着同塔双回、线

路先后建设、线路互斥建设和线路 π 接方案等约束。同塔双回约束要求两条线路要么都不投建要么同时投建，线路先后建设约束要求某条线路必须先于另一条线路先投建，线路互斥建设约束是指两条线路由于自然原因或者人为因素使得两条线路不可能都建设，线路 π 接方案则是指在原来某条已建线路的基础上，从中间某位置拆分该线路，然后在原来线路机组上同时新建两条线路连接第三个节点，如图2所示。

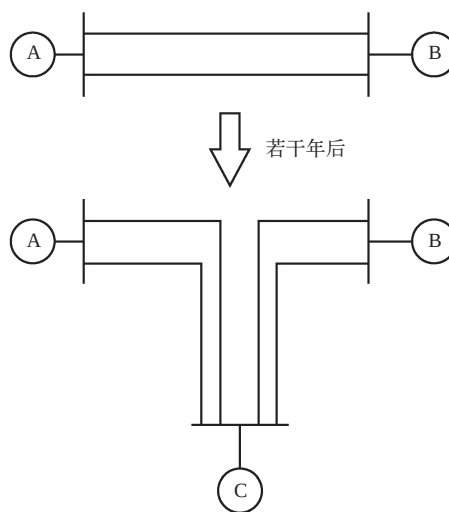


图2 线路 π 接方案示意图

规划模型中将规划待建线路之间的约束或者制约关系分为四种：同时约束、先后约束、互斥约束、 π 接约束。设两条线路 L_x 和 L_y ，第 k 年投建状态变量分别为 I_x^k 和 I_y^k ，以上四种约束处理如下。

1) 同时约束关系。即两条线路同时建设时，会存在相互约束的关系。两条线路 L_x 和 L_y 同时建设为

$$\begin{cases} I_x^k = I_y^k \\ I_x^k \geq I_x^{k-1} \\ I_y^k \geq I_y^{k-1} \end{cases} \quad (9)$$

这两条线路在建设过程中会存在相互制约的关系，因此建设过程中要满足双方线路要求。

2) 先后约束关系，两条线路中一条线路先于另一条线路先建设，先建设的线路会对后建设的线路有约束。

$$\begin{cases} I_x^k > I_y^k \\ I_x^k \geq I_x^{k-1} \\ I_y^k \geq I_y^{k-1} \end{cases} \quad (10)$$

3) 互斥关系。两条线路之间存在相互排斥关系, 如两条线路 L_x 和 L_y , 由于要求不同, 存在互斥关系, 具体表达式为

$$\begin{cases} I_x^k + I_y^k \leq 1 \\ I_x^k + I_y^k \geq I_x^{k-1} + I_y^{k-1} \end{cases} \quad (11)$$

4) π 接约束。两条线路共接在同一条线路上, 线路之间会存在相互约束的关系。假设 L_x 和 L_y π 接线路 L_A , 则会存在的关系为

$$\begin{aligned} I_x^k + I_A^k &\leq 1 & I_y^k + I_A^k &\leq 1 \\ I_x^k + I_A^k &\geq I_A^{k-1} & I_y^k + I_A^k &\geq I_A^{k-1} & I_x^k &= I_y^k \\ I_x^k &\geq I_x^{k-1} & I_y^k &\geq I_y^{k-1} \\ I_x^k &\leq \sum_{j=0}^{k-1} I_A^j & I_y^k &\leq \sum_{j=0}^{k-1} I_A^j \end{aligned} \quad (12)$$

在电网线路规划时要充分考虑几种约束关系, 结合网损模型, 充分考虑电网规划建设方案的投资成本和运行成本, 合理地对主配网建设进行规划, 提出相对经济的规划方案。主网和配网各自的规划本身十分复杂, 而要将两者结合, 则需考虑更多的因素, 因此主配网规划的方案在满足经济环保的前提下还要稳定安全, 难度十分大, 方案也会相对复杂。

3. 电网规划模型

本文在计算规划方案的经济性时将电网规划周期内的投资成本现值、电网系统运行总成本现值、以及周期内价值损失现值作为优化目标, 建立相应模型, 进行目标寻优。并在寻优同时考虑一些约束关系, 例如节点的功率平衡约束, 线路潮流分布约束等等, 根据优化目标函数建立如下的主配网协同的规划模型。

$$\min C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + C' \quad (13)$$

式中, $\min C_{\text{total}}$ 是最小总投资。

算例验证

以Garver 6节点系统作为算例, 进行本文提出的电网规划模型验证, 确认在电网规划方案中考虑网损和线路约束关系是否合理。所选的算例中标么值对应的基准值为 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $V_B = 220 \text{ kV}$, Garver 6节点系统接线图如图3所示, 其他的参数不再详细介绍。假设此系统对应电网的平均电价为 $\$0.015/\text{kW} \cdot \text{h}$, 规划投资的线路建设投资成本单价为 $\$10\,000/\text{km}$ 。结合具体参数和规划模型, 可以到的规划模型的成本现值, 并选择两种传统规划方案的成本与之进行对比, 验证此方案的经济性。

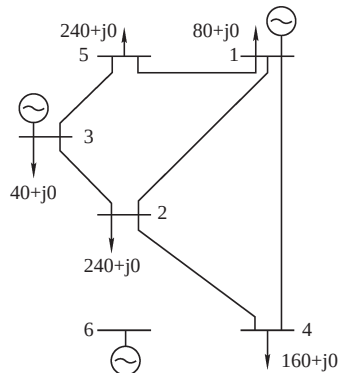


图3 Garver 6节点测试系统接线图

表1 电网规划方案

电网规划方案	新增路线
传统方案1	2-3(1), 2-6(3), 3-5(3), 4-6(5)
传统方案2	1-5(1), 2-3(1), 2-6(3), 3-5(2), 4-6(4)
本文方案	1-5(1), 2-3(2), 2-6(3), 3-5(3), 4-6(5)

表1中, 方案1是一种传统方案, 负荷负荷增长的计划要求和“ $N-1$ ”准则的最小投资现值规划方案, 在该规划方案中, 无论是在系统正常运行状态还是“ $N-1$ ”状态下, 系统运行参数都不能发生越限, 也不需要采取切负荷措施; 方案2为满足负荷增长需求的柔性规划方案, 但是在“ $N-1$ ”情况下允许少量切负荷, 其中 $i-j(k)$ 表示在首节点为 i , 末节点为 j 的架线路径上新增 k 条架线。

几种方案的成本如表2所示。

表2 电网规划方案成本 (单位: 万元)

电网规划方案	C_1	C_2	C'	C_{total}
传统方案1	360	99.46	47 005.65	47 327.65
传统方案2	335	88.41	46 910.7	47 094.06
本文方案	340	80.12	47 237.3	46 010.2

由表2可知, 对比三种方案的规划成本以及三种规划方案的运行稳定性, 可以得出本文的规划方案从整体上更加经济可靠, 因此本文的电网规划方案可行。

结束语

在电力系统不断扩大与智能电网的应用逐步宽广的背景下, 本文针对目前规划中存在的问题, 结合电网规划成本, 建立包含网损模型和线路约束关系模型的主配网协同的电网规划模型, 为当下电网规划设计人员提供规划设计参考。经过算例仿真得出以下结论: ①本文所提模型具有一定的实际应用价值; ②本规划方案在经济性与可靠性方面更好。EA

(收稿日期: 2020.07.10)

(编辑: 朱金凤)