

基于非线性规划遗传算法的外网静态等值参数估计

章家义¹, 陶顺¹, 廖坤玉¹, 肖湘宁¹, 渠通², 温惠²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 国网智能电网研究院, 北京市 昌平区 102209)

Parameter Estimation for External Network Static Equivalent Model Based on Nonlinear Programming Genetic Algorithm

ZHANG Jiayi¹, TAO Shun¹, LIAO Kunyu¹, XIAO Xiangning¹, QU Tong², WEN Hui²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Smart Grid Research Institute, Changping District, Beijing 102209, China)

ABSTRACT: Responding to the situation that the external network information in power systems is completely unknown and in order to analyze the research network, this paper presents a parameter estimation method for external network static equivalent model based on nonlinear programming genetic algorithm to build external network equivalent model. First of all, the typical two-port and three-port external network equivalent model are adopted, and the least squares estimation model of the equivalent parameters is deduced based on power equation of boundary nodes; then, combining the nonlinear programming method with genetic algorithm, a combinatorial intelligent optimization algorithm is put forward; finally, the nonlinear programming genetic algorithm is applied to estimate the external network static equivalent parameters. The proposed optimization algorithm does not require the initial value and can obtain the global optimal solution which is in accord with physical interpretation. Taking two-port and three-port equivalent for example, through simulation analysis of IEEE14 bus system and by comparing power flow distribution of the research system before and after the equivalent, the validity and versatility of the proposed method is verified.

KEY WORDS: external static equivalent; parameter estimation; least squares; global optimum; nonlinear programming genetic algorithm

摘要: 针对电力系统外部网络信息未知的情况, 为了对研究网络进行系统分析, 提出一种基于非线性规划遗传算法的外网静态等值参数估计方法, 来建立外网等值模型。首先, 采用典型的双端口和三端口外网等值模型, 通过边界节点的功率方程推导出等值参数的最小二乘估计模型; 然后, 结合非线性规划方法与遗传算法, 提出一种组合智能优化算法; 最后, 运用非线性规划遗传组合算法进行外网静态等值参数的估计。提出的优化算法, 不需要设定初值, 能够更好地得到符合物理解释的全局最优解。以双端口和三端口等值为例, 通过 IEEE 14 节点系统的仿真分析, 并对比等值前后研究系统的潮流分布, 验证所提方法的正确性和通用性。

关键词: 外网静态等值; 参数估计; 最小二乘; 全局最优; 非线性规划遗传算法

0 引言

目前, 在我国电力调度管理模式及电力市场条件下, 各互联电网之间的完备电网结构及其内部信

息仍无法实现实时共享, 从而导致各独立子系统内的潮流计算出现较大的困难^[1]。因此, 针对外网结构和状态信息完全未知或非常复杂的情况, 有必要研究具有实际应用价值的外网静态等值模型及其参数估计方法。

根据目前国内外对外网静态等值模型的研究可知, 外网建模的主要方法有: Ward 等值法和辐

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGRI-DL-71-13-002)。

Project Support of the State Grid Corporation of China (SGRI-DL-71-13-002).

射等值独立法(redicel equivalent independent, REI)等值法以及相应的改进法^[2-7],保留详细外网模型的未化简外网等值方法^[8],用于电网络简化等值的经典方法—诺顿等值法或戴维南等值法^[9-10]。前3类方法都必须已知外网的完备模型或者外部网络全部状态信息,不适用于外部网络信息完全未知的等值问题。戴维南或诺顿等值法日趋完善,但该类方法解决的仅仅是单端口网络的静态等值问题,无法解决大型电网中双端口以及多端口的的外网静态等值的情况。

文献[11]提出的电力系统相邻两节点同时等值方法和文献[12]基于内网实测信息的两端口外网静态等值估计方法分别采用牛顿-拉夫逊迭代法和高斯-牛顿迭代法来求解等值参数的非线性最小二乘估计模型。经典的传统局部优化方法(最速下降法、牛顿法、共轭梯度法等)需要选取合理的初值,否则极易陷入局部最优,无法得到全局最优解甚至不收敛。在实际应用中,选择合理的初始值通常比较困难,尤其是在多端口、待求参数较多的情况下。而且,对于含约束的优化问题,牛顿法也显示出了其局限性,通常导致得到的参数结果无法给予合理的物理解释。为解决上述问题,本文采用求解约束优化问题的非线性规划算法与遗传算法相结合的算法来进行函数寻优,求解非线性最小二乘参数估计模型,从而更准确地获取符合物理解释的双端口外网静态等值参数,并最终扩展到多端口的等值参数估计。最后,通过 IEEE14 节点系统进行仿真实验,论证了本文所提方法的准确性和通用性。

1 外网静态等值简化模型及其参数的最小二乘估计模型

1.1 双端口外网静态等值模型

电力系统分析中,对任何一互联电网都可以将其划分为两部分:研究系统和外部系统。其中,研究系统又分为内部系统和边界系统。边界系统包括外部系统与内部系统之间相互联系的边界节点以及边界节点与内部系统的连接支路。因此,在电力系统进行简化等值时,任意一个实际的电力系统网络都可被分为外部系统、边界系统以及内部系统3部分^[13],图1为双端互联系统示意图。

当外部网络信息完全未知时,外网对内网而言就相当于一个“黑箱”^[14]。为了兼顾等值外网对边

界节点的电压支撑作用和对内网潮流的影响,通常在每个边界节点与外部系统相连部分将其等值成电源形式,即一个“电压源+串联阻抗”的形式。同时考虑到边界节点之间的耦合关系,在双端口外网等值模型中还需计及边界节点间的耦合阻抗。

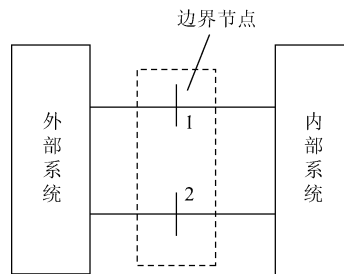


图1 双端互联系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of two-port interconnected system

本文采用文献[12]中所提出的扩展电压源支路外网 Ward 等值模型(extend voltage-source branch ward-equivalence model, EWM),双端口外网等值电路模型如图2中所示。

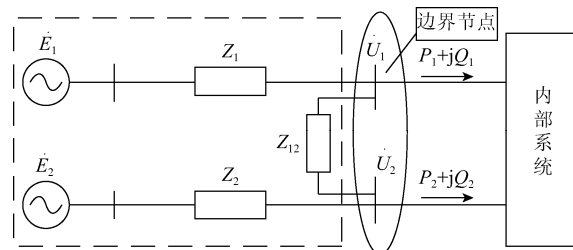


图2 双端口外网 EWM 等值电路模型
Fig. 2 Equivalent circuit model of EWM of the two- port external network

图2中, \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 分别为扩展支路等值电源的电压; Z_1 、 Z_2 分别为扩展支路等值的串联阻抗; Z_{12} 分别为两个边界节点间的耦合阻抗; \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 分别为两边界节点处的电压相量; P_1 、 Q_1 和 P_2 、 Q_2 分别为边界节点流向内部系统的潮流(有功和无功)。

1.2 双端口外网等值参数的最小二乘估计模型

设外部系统的等值参数为

$$\begin{cases} \dot{E}_i = E_i \angle \delta_i \\ Y_i = \frac{1}{Z_i} = G_i + jB_i \\ Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} = G_{ij} + jB_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

其中 i 、 j 分别为两个边界节点。

根据电力系统稳态知识可知,线路 $i-j$ 之间的

功率方程有

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ij} &= P_{ij} + jQ_{ij} = \\ \dot{U}_i \dot{I}_{ij}^* &= \dot{U}_i \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{Z_{ij}} \right)^* \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可知,对于双端口等值系统的边界节点分析,外部等值电源 \dot{E}_i 流入相应边界节点 i 的注入功率方程为

$$\begin{aligned} \tilde{S}'_i &= P'_i + jQ'_i = \\ -\dot{U}_i \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{E}_i}{Z_i} \right)^* &= -\dot{U}_i [(G_i - jB_i)(\dot{U}_i - \dot{E}_i)^*] \end{aligned} \quad (3)$$

边界节点 i 流向相邻边界节点 j 的支路功率方程为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ij} &= P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{U}_i \dot{I}_{ij}^* = \\ \dot{U}_i \left(\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{Z_{ij}} \right)^* &= \dot{U}_i [(G_{ij} - jB_{ij})(\dot{U}_i - \dot{U}_j)^*] \end{aligned} \quad (4)$$

则各边界节点注入内部系统的功率为

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \tilde{S}'_i - \tilde{S}_{ij} \quad (5)$$

将式(3)和(4)代入(5),展开分离其实部与虚部,整理可得:

$$\begin{aligned} P_i &= E_i U_i [G_i \cos(\theta_i - \delta_i) + B_i \sin(\theta_i - \delta_i)] - G_i U_i^2 - \\ &\quad \left\{ -U_i U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] + G_{ij} U_i^2 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q_i &= E_i U_i [G_i \sin(\theta_i - \delta_i) - B_i \cos(\theta_i - \delta_i)] + B_i U_i^2 - \\ &\quad \left\{ -U_i U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] - B_{ij} U_i^2 \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $i, j=1,2$ 分别为不同的边界节点; E_i 、 δ_i 、 G_i 、 B_i 、 G_{ij} 、 B_{ij} 为外部系统的等值参数,构成待估计参数,共 10 个; U_i 、 θ_i 、 P_i 、 Q_i ($i=1,2$) 为边界节点的量测信息,为已知量。以 U_i 、 θ_i 为输入量, P_i 、 Q_i 为输出量,建立外部系统的等值模型。如果只考虑一个测量时段信息,并假设内部网络的模型参数和状态信息全部已知,则仅由式(6)、(7)可得出两边界点的两组共 4 个功率方程,并不能够求解出 10 个未知外网等值参数。因此,不妨假设在电网状态发生小幅变化时,外网的静态等值参数认为近似保持不变,由此根据边界节点多时段的测量信息,建立等值参数的最小二乘估计模型。

式(6)和式(7)的功率方程可简化为

$$0 = f_m^t(X_s) \quad (8)$$

其中: $m=1,2,3,4$, 为 4 个功率方程;

$X_s = [E_1 \ \delta_1 \ E_2 \ \delta_2 \ G_1 \ B_1 \ G_2 \ B_2 \ G_{12} \ B_{12}]$; $f_m^t(\cdot)$

为不同时间段式(6)和(7)的一般表达式。

最后,等值参数多时段的最小二乘估计模型可表示为

$$J = \min \sum_{t=1}^N \sum_{m=1}^4 (f_m^t(X_s))^2 \quad (9)$$

式中 N 为时段数。综合考虑 EWM 模型的可解性和量测方程的冗余性及等值精度,推荐 $N=3$ 。

针对式(9)的目标函数,利用优化算法可以找到使 J 最小的 1 组 X_s , 此 X_s 即为所求外网等值估计参数。

1.3 3 端口外网静态等值模型及其等值参数的最小二乘估计模型

基于上述双端口外网静态等值思路,3 端口外网等值电路模型如图 3 所示。其中,每个边界节点与另外两个边界节点均存在耦合阻抗。

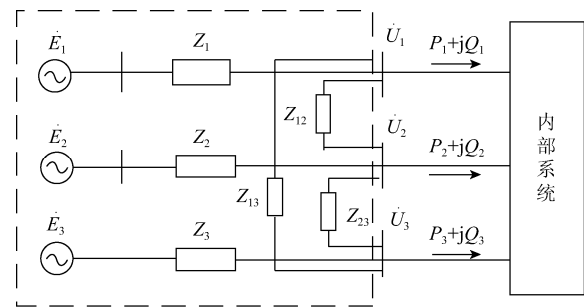


图 3 3 端口外网静态等值电路模型
Fig. 3 Static equivalent circuit model of three-port external network

3 端口系统中,由于每个边界节点都与另外两个边界节点存在耦合,故此时代各边界节点注入内部系统的功率方程变为

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \tilde{S}'_i - \tilde{S}_{ij} - \tilde{S}_{ik} \quad (10)$$

其中 \tilde{S}_{ik} 为边界节点 i 流向另一相邻边界节点 k 的支路功率。

与双端口类似,同理可推导出三端口外网静态等值参数最小二乘估计模型:

$$J = \min \sum_{t=1}^N \sum_{m=1}^6 (f_m^t(X_s))^2 \quad (11)$$

此时,待估参数共 18 个,综合考虑模型的可解性、量测方程的冗余性以及等值精度,取 $N=4$ 。

同理,可将上述模型推广到多端口外网等值。

2 非线性规划遗传算法

传统的非线性规划算法通常采用内外点法、梯

度下降等方法进行求解，其局部搜索的能力非常强，但全局搜索的能力相对较弱^[15]。如果未知参数的初始值设定不当，则计算将难以收敛，最终也无法求得正确结果。遗传算法采用选择、交叉和变异算子进行搜索，能以一定概率跳出局部最优解，全局搜索能力较强，并可进行分布计算，求解速度快，其寻优过程中初值随机给出。但遗传算法易出现早熟现象，即进化初期出现适应度较高的个体，繁殖过快，破坏群体多样性；而且在逼近最优解 90%后，达到最优解时花费时间长，局部搜索能力变差，导致最优解的分布不理想^[16]。因此，将非线性规划算法(本文采用 MATLAB 优化函数 `fmincon`)和遗传算法两者的优点相结合：采用遗传算法进行全局搜索的同时，充分发挥非线性规划算法的局部搜索能力，使最大概率得到全局最优解的同时，又能保证运算速度和最优解较好的均匀性、较强的逼近性^[15]，非线性规划遗传算法流程图如图 4 所示。

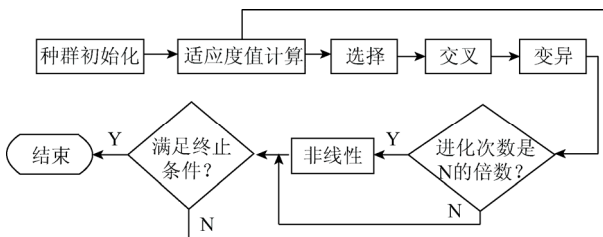


图 4 非线性规划遗传算法流程图

Fig. 4 Flow chart of nonlinear programming genetic algorithm

图 4 中，种群初始化部分根据具体问题来初始化种群，适应度值计算部分根据所列出的适应度函数来计算相应染色体的适应度值，最后经过选择、交叉和变异进行全局搜索。 N 为综合考虑精度和运算速度选择的值，即当进化次数达到 N 的倍数时，采用非线性的寻优方法来加快进化。其中，非线性寻优过程利用当前染色体值并采用 `fmincon` 函数来寻找局部最优解。

基于非线性规划遗传算法的外网静态等值参数估计的步骤如下：

1) 测量稳态条件下边界节点的潮流信息，其中包括两边界节点的电压相量($U_i \angle \theta_i$)，两边界节点分别流向内部系统的功率(P_i 、 Q_i)；

2) 边界节点处的有功和无功按 $\pm 1\%$ 的步长变化，重新进行潮流计算，得到边界节点连续时段的两组(或 3 组)潮流信息；

3) 利用步骤 1)、2) 得到的 3 组(或 4 组)测量

信息，代入式(6)和(7)中，并简化为式(8)，最后建立如式(9)或(11)所示的等值参数最小二乘估计模型，其约束条件为： $0.9 < E_i < 1.2$ ， $G_i > 0$ ， $B_i < 0$ ， $G_{ij} > 0$ ， $B_{ij} < 0$ ， $-90 < \delta_i < 90$ ；

4) 根据非线性规划遗传算法的算法流程，利用 Matlab 数学工具编程进行带约束条件的估计模型求解，寻优最终得到外网等值估计参数 E_i 、 δ_i 、 G_i 、 B_i 、 G_{ij} 、 B_{ij} ，并转化为 EWM 的外网等值模型。

基于本文方法建立外网静态等值模型的总体流程图如图 5 所示。

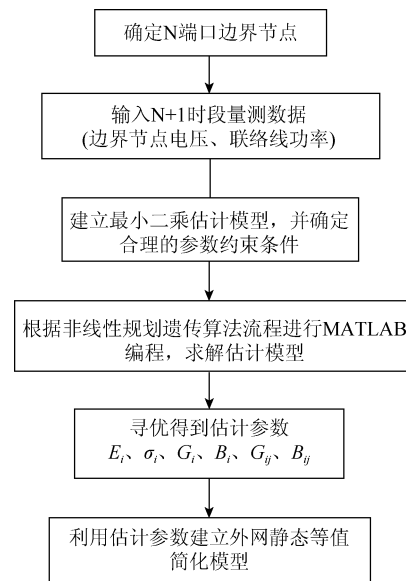


图 5 外网静态等值流程图

Fig. 5 Flow chart of static equivalent of external network

3 算例分析

3.1 仿真条件

以 IEEE14 节点标准测试系统为例进行仿真分析，其拓扑结构如图 6 所示。

图 6 中，将 IEEE14 节点系统划分为 3 部分：外部系统、边界系统以及内部系统。其中，节点 1、2、3、7、8 为外部系统(如图 6 虚线框内除边界节点外)；节点 4 和 5 为边界节点；其余部分为内部系统。

按照 EWM 等值思路将外部网络进行等值，IEEE14 节点系统可简化为如图 7 所示。

基于 PSCAD 软件建立 IEEE14 节点系统仿真模型，在边界节点 5 处接入一可控的波动负荷，使系统潮流状态发生小幅变化，进行潮流计算，得到 3 组边界节点的测量信息；然后利用本文方法进行外

网静态等值参数的估计,并将参数转化为标准形式代入图7所示等值电路中;最后分别计算等值后系统与原系统的潮流,对比分析研究系统的潮流分布变化。

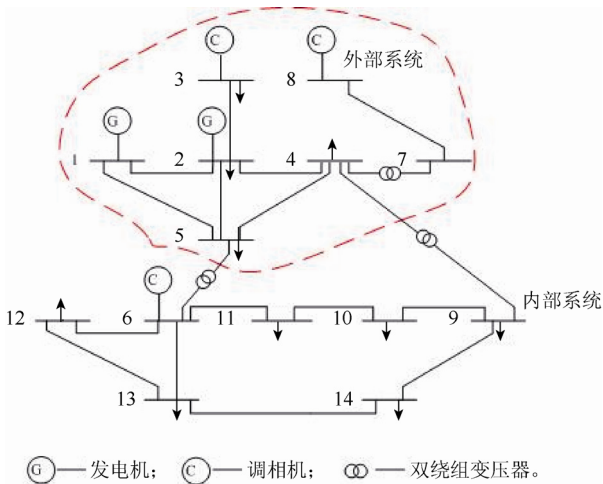


图6 IEEE14节点系统拓扑图

Fig. 6 Topology of IEEE 14-bus system

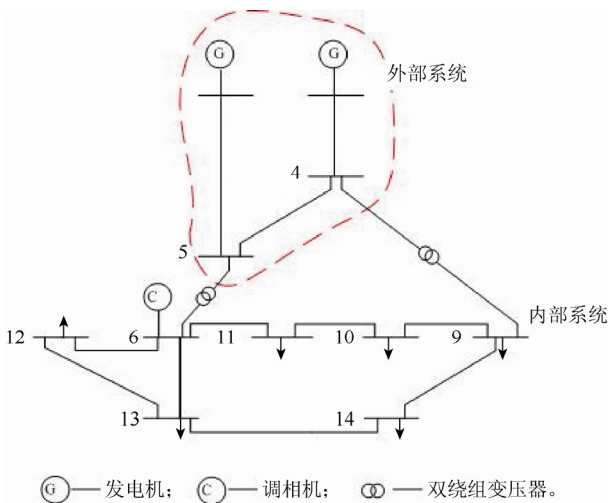


图7 IEEE14节点等值简化图

Fig. 7 Simplified equivalent diagram of IEEE 14-bus system

为论证本文等值参数估计方法对多端口外网等值的普适性,将IEEE14节点进行适当修改,形成3端口外网:连接节点7和9,此时边界节点变为节点4、5、7;内部系统与原来双端口时情况相同;其余部分为外部系统。按照基于非线性规划遗传算法的外网静态等值参数估计流程,估计出3端口外网静态等值的1组参数。然后对等值前后的系统进行潮流计算,对比分析相应研究系统的潮流分布信息。

3.2 仿真结果

1) 双端口外网静态等值参数估计值(有名值):

$$\begin{cases} \dot{E}_4 = E_4 \angle \delta_4 = 18.2682 \angle -11.0138^\circ \text{ kV} \\ \dot{E}_5 = E_5 \angle \delta_5 = 18.5022 \angle -5.7571^\circ \text{ kV} \\ Z_4 = 0.01879 + j0.13187 \Omega \\ Z_5 = 0.0486 + j0.15811 \Omega \\ Z_{45} = j0.44647 \Omega \end{cases} \quad (12)$$

等值前后研究系统各节点的电压幅值和相位变化情况如表1所示。

表1 等值前后研究系统节点电压变化

Tab. 1 Node voltage change of the research system before and after the equivalent

节点	等值前		等值后		电压幅值相对误差/%	电压相位相对误差/%
	电压幅值/kV	电压相位/(°)	电压幅值/kV	电压相位/(°)		
4	18.107	-10.640	18.081	-10.643	0.144	0.028
5	17.929	-7.863	17.936	-7.881	0.039	0.229
6	17.690	-15.192	17.690	-15.207	0.000	0.099
9	16.882	-17.925	16.873	-17.929	0.053	0.022
10	16.824	-17.608	16.817	-17.614	0.042	0.034
11	17.121	-16.514	17.118	-16.524	0.018	0.061
12	17.290	-16.076	17.291	-16.091	0.006	0.093
13	17.195	-16.403	17.194	-16.416	0.006	0.079
14	16.528	-18.459	16.523	-18.466	0.030	0.038

由表1可知:等值前后研究系统网络的节点电压幅值和相位基本一致,节点电压幅值和相位相对误差在0.5%以内,说明外部系统等值充分考虑了对内部系统的电压支撑作用。

等值前后研究系统各支路潮流分布变化情况如表2所示。

表2 等值前后研究系统支路潮流分布变化

Tab. 2 Changes of power flow distribution of the branches in research system before and after the equivalent

支路	等值前		等值后		有功功率率相对误差/%	无功功率率相对误差/%
	有功功率/MW	无功功率/Mvar	有功功率/MW	无功功率/Mvar		
	4—9	22.205	20.132	22.164		
5—6	53.174	39.866	53.180	40.057	0.011	0.479
6—11	14.954	8.601	14.956	8.702	0.013	1.174
6—12	7.969	4.733	7.971	4.746	0.025	0.275
6—13	20.544	10.460	20.545	10.511	0.005	0.488
9—10	-3.842	5.030	-3.848	4.926	0.156	2.068
9—14	5.060	4.453	5.048	4.387	0.237	1.482
10—11	-10.347	-3.526	-10.348	-3.622	0.010	2.723
13—14	11.377	4.751	11.380	4.813	0.026	1.305

由表 2 可知：等值前后研究系统网络各支路的有功功率相对误差较小，均保持在 0.5%以内；无功功率相对误差在 3%以内。等值前后研究系统的潮流分布总体基本一致，说明外部系统等值考虑了对内网潮流的影响。

由表 1—2 可知，本文提出的估计方法适用于双端口外网静态等值参数估计，等值前后研究系统的潮流分布和各节点电压基本保持一致。

2) 3 端口外网静态等值参数估计值(有名值):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_4=18.6\angle -12.51^\circ \text{ kV} \\ Z_4=0.0499+j0.0525 \Omega \\ Z_{45}=0.0658+j0.0224 \Omega \\ \dot{E}_5=16.66\angle -3.11^\circ \text{ kV} \\ Z_5=0.0483+j0.1063 \Omega \\ Z_{47}=0.3366+j0.2006 \Omega \\ \dot{E}_7=20.24\angle -11.21^\circ \text{ kV} \\ Z_7=0.0053+j0.1956 \Omega \\ Z_{57}=0.4076 \Omega \end{array} \right. \quad (13)$$

等值前后研究系统各节点的电压幅值和相位变化情况如表 3 所示。

表 3 等值前后研究系统节点电压变化

Tab. 3 Node voltage change of the research system before and after the equivalent

节点	等值前		等值后		电压幅值相对误差/%	电压相位相对误差/%
	电压幅值/kV	电压相位/(°)	电压幅值/kV	电压相位/(°)		
4	18.181	-10.600	18.121	-10.441	0.330	1.500
5	18.112	-7.637	18.050	-7.491	0.342	1.912
7	18.686	-13.106	18.644	-12.881	0.225	1.717
6	18.386	-13.318	18.328	-13.144	0.315	1.307
9	18.191	-14.651	18.145	-14.449	0.253	1.379
10	18.063	-14.674	18.015	-14.477	0.266	1.343
11	18.077	-14.020	18.025	-13.835	0.288	1.320
12	18.118	-14.202	18.062	-14.026	0.309	1.239
13	18.019	-14.294	17.964	-14.117	0.305	1.238
14	17.672	-15.323	17.624	-15.132	0.272	1.246

等值前后研究系统支路潮流分布变化情况如表 4 所示。

表 3 表明，等值前后系统节点电压幅值相对误差较小，均在 0.5%以内；电压相位相对误差在 2%以内，基本保持一致。表 4 表明，等值前后系统的功率分布基本保持一致，相对误差均在 5%以内。

综上所述，由表 3—4 可知，本文所提估计方法对于 3 端口外网静态等值参数的估计同样适用。

3) 鲁棒性验证。

为了进一步论证该等值参数估计方法的鲁棒性，即当内部电网负荷发生一定变化时，将同一组外网等值参数的适用性，进行下面的仿真实验。

针对双端口等值问题，在 IEEE14 节点系统节点 11 处增加 10 Mvar 的无功负荷，节点 9 减少 10 MW 的有功负荷，同样采用式(9)得到的外网等值参数，分别进行负荷变化后的原系统与等值系统的潮流计算，其结果如表 5—6 所示。

表 4 等值前后研究系统支路潮流分布变化

Tab. 4 Changes of power flow distribution of the branches in research system before and after the equivalent

支路	等值前		等值后		有功功率率相对误差/%	无功功率率相对误差/%
	有功功率/MW	无功功率/Mvar	有功功率/MW	无功功率/Mvar		
	4—9	13.385	6.418	13.163		
5—6	43.322	27.082	42.836	26.745	1.122	1.244
7—9	25.729	26.295	25.985	26.433	0.995	0.525
6—11	8.593	4.756	8.406	4.658	2.176	2.061
6—12	7.382	2.450	7.318	2.429	0.867	0.857
6—13	17.134	7.397	16.960	7.316	1.016	1.095
9—10	3.236	7.330	3.355	7.355	3.677	0.341
9—14	7.687	7.197	7.735	7.198	0.624	0.014
10—11	-5.202	1.854	-5.038	1.906	3.153	2.805
13—14	6.300	2.495	6.175	2.441	1.984	2.164

表 5 等值前后研究系统节点电压变化

Tab. 5 Node voltage change of the research system before and after the equivalent

节点	等值前		等值后		电压幅值相对误差/%	电压相位相对误差/%
	电压幅值/kV	电压相位/(°)	电压幅值/kV	电压相位/(°)		
4	18.103	-10.409	18.077	-10.526	0.144	1.124
5	17.897	-7.558	17.913	-7.710	0.089	2.011
6	17.417	-14.214	17.424	-14.360	0.040	1.027
9	16.778	-16.302	16.774	-16.428	0.024	0.773
10	16.696	-16.109	16.694	-16.238	0.012	0.801
11	16.927	-15.283	16.929	-15.420	0.012	0.896
12	16.819	-14.592	16.825	-14.737	0.036	0.994
13	16.885	-15.271	16.890	-15.414	0.030	0.936
14	16.342	-17.057	16.341	-17.191	0.006	0.786

表6 等值前后研究系统支路潮流分布变化

Tab. 6 Changes of power flow distribution of the branches in research system before and after the equivalent

支路	等值前		等值后		有功功率相对误差/%	无功功率相对误差/%
	有功功率/MW	无功功率/Mvar	有功功率/MW	无功功率/Mvar		
	4—9	17.863	20.658	17.860		
5—6	47.491	44.778	47.507	45.052	0.034	0.612
6—11	12.136	7.533	12.132	7.665	0.033	1.752
6—12	6.803	9.302	6.809	9.326	0.088	0.258
6—13	19.142	12.376	19.149	12.449	0.037	0.590
9—10	-1.352	5.578	-1.347	5.448	0.370	2.331
9—14	6.615	5.289	6.613	5.207	0.030	1.550
10—11	-7.757	-2.842	-7.749	-2.968	0.103	4.434
13—14	9.413	3.631	9.415	3.713	0.021	2.258

对比表2和6可以看出,内网节点负荷发生变化,导致边界节点4、5注入内部系统的有功波动达到10%以上;5—6支路无功波动达到12.3%。但从表5—6可知,等值前后系统的潮流分布和节点电压依然基本保持一致,说明当内网负荷在一定范围内变化时,同一组外网等值参数依然适用,表明了本文所提的等值参数估计方法具有一定的抗干扰性。但必须说明的是,由于该等值方法属于静态等值的范畴,当系统运行方式发生变化或研究系统内负荷发生较大改变,导致边界的电压、电流发生很大变化时,需要对外部系统的等值参数重新进行估计。

4 结论

本文推导出外网EWM模型的等值参数多时段的最小二乘估计模型,通过非线性规划方法同遗传算法相结合的思路,提出了一种基于非线性规划遗传算法的外网静态等值参数估计方法。非线性规划遗传算法函数寻优跳出了局部最优,在求解结果和收敛速度上都优于传统算法,并且该算法不需要设置迭代初值,避免了因初值选择不当出现的问题,更具普适性。本文所提的等值参数估计方法只需 N 时段边界节点系统的潮流状态,可操作性强,并对内网潮流分布变化具有较强的抗干扰性。

仿真实验证明本文所提方法的正确性和有效性,能够很好地解决外网参数完全未知或外网结构

复杂情况下的系统静态等值问题。双端口和三端口的等值验证进一步说明了该方法的通用性。通过算法的改进或者外网等值模型的简化,能够进一步提高等值精度,并可扩展到多端口外网静态等值参数的估计。

参考文献

- [1] 姚建国, 杨胜春, 高宗和, 等. 电网调度自动化系统发展趋势展望[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 7-11.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, GAO Zonghe, et al. Development trend prospects of power dispatching automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 7-11(in Chinese).
- [2] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 87-133.
- [3] WARD J B. Equivalent circuits for power-flow studies[J]. Electrical Engineering, 1949, 68(9): 794.
- [4] KATO K. External network modeling-recent practical experience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 216-228.
- [5] DECKMANN S, PIZZOLANTE A, MONTICELLI A, et al. Studies on power system load flow equivalencing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1980: 2301-2310.
- [6] NETO A C, RODRIGUES A B, PRADA R B, et al. External equivalent for electric power distribution networks with radial topology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 889-895.
- [7] 温伯坚, 张海波, 张伯明, 等. 广东省地区电网外部等值自动生成系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 77-83.
WEN Bojian, ZHANG Haibo, ZHANG Boming, et al. Design of a real-time external network auto-equivalence system of subtransmission networks in Guangdong[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 77-83(in Chinese).
- [8] KORRES G N. A Partitioned state estimator for external network modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 834-842.
- [9] 刘明松, 张伯明, 姚良忠, 等. 基于PMU和改进戴维南等值模型的电压稳定在线监视[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 6-10.
LIU Mingsong, ZHANG Boming, YAO Liangzhong, et al. On-line voltage stability monitoring based on PMU and improved Thevenin equivalent model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 6-10(in Chinese).
- [10] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 48-53.
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 48-53(in Chinese).
- [11] 穆子龙, 李兴源, 刘一民, 等. 电力系统相邻两节点同时等值的方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 32-37.
MU Zilong, LI Xingyuan, LIU Yimin, et al. A simultaneous equivalent method for two adjacent nodes in power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 32-37(in Chinese).

- [12] 颜伟, 李世明, 陈俊, 等. 基于内网实测信息的两端口外网静态等值参数估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 101-106.
YAN Wei, LI Shiming, CHEN Jun, et al. Parameter estimation for two-port external network static equivalent model on the basis of internal network measured information[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 101-106(in Chinese).
- [13] 余娟, 张勉, 朱柳, 等. 考虑灵敏度一致性的外网静态等值新理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 64-72.
YU Juan, ZHANG Mian, ZHU Liu, et al. New theory on external network static equivalent based on sensitivity consistency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 64-72(in Chinese).
- [14] 萧德云. 系统辨识理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 4-26.
- [15] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 17-26.
- [16] 袁晓辉. 基于遗传算法的非线性规划问题求解[D]. 武汉: 武汉理

工大学, 2002.

收稿日期: 2015-04-14.

作者简介:

章家义(1989), 男, 硕士, 主要研究方向为电能质量分析与评估, zhang1989726@126.com;

陶顺(1972), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能配电网、电能质量, tao_shun@sina.com;

廖坤玉(1989), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与评估, lky@ncepu.edu.cn;

肖湘宁(1953), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为新能源电网、电能质量等, xxn@ncepu.edu.cn;

渠通(1988), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为模式识别、电能质量等;

温惠(1985), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电能质量及电力电子技术在电力系统中的应用等, wenhui@sgri.sgcc.com.cn.

(编辑 李静)