

基于电气剖分原理的风电系统调度方法

陈宁, 于继来

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Electrical Dissection Theory Based Dispatching Approach for Power Network Containing Wind Farms

CHEN Ning, YU Ji-lai

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Based on electrical dissection theory, a dispatching approach for power network with containing wind farms is proposed. Through searching the conventional power generation units that are tightly related to the wind farms by electrical dissection, the approach can compensate the shortage or surplus of active power caused by the fluctuation of output power of wind farms by means of adjusting the outputs of these searched units. Calculation results for the modified IEEE 14-bus system show that the approach is feasible and practical.

KEY WORDS: electrical dissection; wind power system; dispatching

摘要: 基于电气剖分原理提出了一种风电系统调度方法, 该方法通过电气剖分寻找与风电场关系最紧密的常规机组, 通过对这些机组进行输出功率调整来及时补偿由风电场输出功率波动引起的有功功率缺失(或过剩)。以修改后的 IEEE14 节点系统进行了算例分析, 结果表明该方法是可行的且具有较强的实用性。

关键词: 电气剖分; 风电系统; 调度

0 引言

能源危机和环境问题促使风力发电得到了越来越大规模的发展, 风电将成为中国第三大主力发电能源^[1]。但风力发电存在着因风能的随机性或间歇性而造成的输出电功率频繁变动的问题, 给电力系统调度带来了新的困难, 使运行和调度人员难以

像对待传统电源那样准确地给出风电输出功率的调度计划指令, 从而引起风电场实际输出功率与预测值之间存在较大偏差, 使系统运行状况极有可能恶化。为避免出现这种不良现象, 需要合理调度系统中的其他机组以及时补偿风电带来的调度偏差。当系统中风电场数量较多、风电比重较大且风电场的输出功率波动较大时, 系统中其他机组能否最及时、准确地给予相应的有功功率补偿至关重要。

传统的调度方法主要是通过数学优化手段来实现, 其基础是电源的可靠性和负荷的可预测性。但是当系统内包含风电场时, 因为风电场输出功率的预测水平还达不到工程实用的程度, 所以依靠传统调度方法来制定发电计划变得非常困难^[2]。文献[3-5]对传统调度方法加以改进, 提出了对风电并网以后的系统发电计划进行优化及经济调度的算法, 但这些算法仍然基于对风速和负荷的预测。文献[6]指出需要研究随机的发电计划算法和自动发电控制(automatic generation control, AGC)算法, 以便正确考虑风电的随机性和间歇性。

如果能够了解源流之间的电气关系, 具体到某电源通过某路径向某负荷供电或某负荷通过某路径从某电源吸收功率, 就可以清楚地了解功率缺失的具体位置和路径, 这对于及时调整相关机组的输出功率或减小 AGC 容量补偿的实际功率偏差是有益的。文献[7-9]在文献[10-12]的基础上提出了多种潮流追踪方法以获取系统潮流分布情况和相关灵敏度系数, 这些方法往往简化了网络原理的约束, 普遍以比例分摊原则为基础, 较注重数学方法的应用, 而文献[13-15]提出的电气剖分原理从物理角度揭示了电力网络中的源流路径, 遵循基本的电气规律。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477008); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040213031); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E0326)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50477008); Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20040213031); Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (E0326).

基于上述分析,本文提出一种基于电气剖分原理的风电系统调度方法,该方法能够通过风电机组及其供电负荷之间的输电线路的电气剖分而获得具体的路径使用信息,并由此通过对常规机组的功率调整以实现因风电机组功率波动而产生的功率不平衡量。最后以包含风电系统的在线调度计划(5 min)和超短时在线调度计划(1 min)^[16]之间的调整为例对该方法进行说明和验证。

1 电气剖分原理及方法

根据文献[13-15],电气剖分原理从物理角度揭示了电力网络中的源流路径,所遵循的基本电气规律包括基尔霍夫电压和电流定律、欧姆定律、能量守恒定律及无功功率的朗日万定律。其剖分结果中所有参数和拓扑必须具有保持性,即:①各剖分子网络只能是原网络的一部分,不能添加新的网络;②剖分子支路的电阻及电抗并联值必须与原支路的电阻及电抗值相等;③节点电压和电流的相应分量应与剖分子支路上的电压和电流分量保持特定的幅值和相位关系;④剖分子支路上的功率或能量性质应保持原支路的性质。

可将电气剖分为3类:①一源多流;②多源一流;③多源多流。文献[15]详细叙述了电气剖分方法,下面仅以第①类中某条普通支路和含有电源支路2种情况为例简单说明电气剖分过程,设 $P=P_1+P_2$ 为支路受端节点有功功率之和。

图1为不含电源的普通支路,其中: U_T 和 U 分别为支路送、受端的节点电压相量; Z_T 为支路阻抗; P_1+jQ_1 和 P_2+jQ_2 为2个受端流出的功率。图2为图1的剖分结果,其中: $Z_{T1}=Z_T P/(P_1+\Delta P_x)$ 和 $Z_{T2}=Z_T P/(P_2-\Delta P_x)$ 为剖分子支路的阻抗; $\Delta P_x=Q(P_2 Q_1-P_1 Q_2)/(P^2+Q^2)$ 和 $\Delta Q_x=P(P_2 Q_1-P_1 Q_2)/(P^2+Q^2)$ 分别为2条剖分子支路之间的有功和无功交换功率。

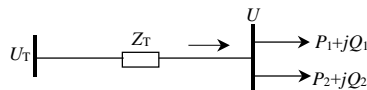


图1 原始支路

Fig. 1 Original branch

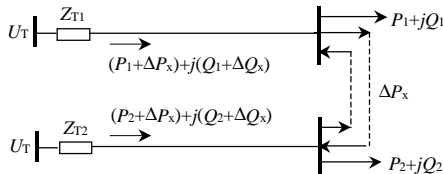


图2 图1的剖分结果

Fig. 2 Result of dissection for Fig1

图3为含电源支路,其中: S_{BF} 为支路功率; S_G 为节点电源功率;负荷的功率由支路功率和节点电源功率2部分组成。图4为图3所示含电源支路的电气剖分结果,其中, $S_{BF1}=U[(U_T-U)/Z_{T1}]^*$ 和 $S_{BF2}=U[(U_T-U)/Z_{T2}]^*$ 分别为2条剖分子支路的支路功率; $S_{G1}=S_G(P_1+\Delta P_x)/P$ 和 $S_{G2}=S_G(P_2-\Delta P_x)/P$ 分别为2条剖分子支路的节点电源功率。其他几类情况的剖分过程与上述过程类似。

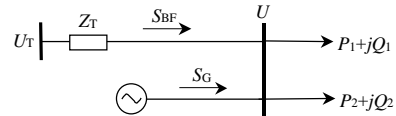


图3 含电源支路

Fig. 3 Branch with electrical source

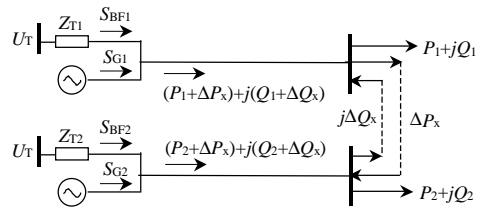


图4 图3的剖分结果

Fig. 4 Result of dissection for Fig3

2 本文方法的基本思路

本文所提方法主要用于在线调度和超短时在线调度时段的发电计划调整,假设调峰机组具有足够的响应能力。本文方法的基本思路如图5所示。

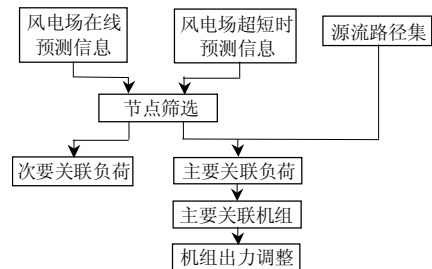


图5 包含风电场的电力系统调度方法

Fig. 5 Sketch map for the dispatch

首先利用电气剖分方法对电网实时状态进行剖分并建立源流路径集,该路径集包括风电场、主要关联负荷、主要关联机组、次要关联负荷和次要关联机组、剖分路径、剖分线路阻抗和剖分线路功率,如图6所示。其中:主要关联负荷与风电场直接相连,并由风电场提供一定功率;主要关联机组与主要关联负荷相连并对其供电且不包含风电场;次要关联负荷与主要关联机组直接相连,并由主要关联机组提供部分功率但又不与风电场直接相连;次要关联机组与次要关联负荷直接相连并对其供

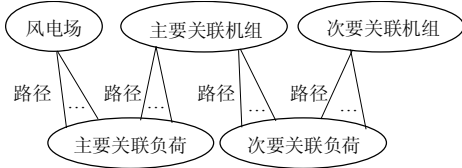


图6 源流路径集

Fig. 6 Sketch map for set of path

电且不包含主要关联机组。

其次通过风电场在线预测信息与风电场超短时预测信息进行比对确定出现偏差的风电场节点，并在源流路径集中通过节点筛选选出受风电场影响的负荷节点及相关电源(即主要关联负荷和主要关联机组)。最后对主要关联机组的输出功率做出相应调整以使系统功率平衡。

由于掌握了源流供电路径，在调节时无论是以网损最小为目标还是以发电成本最小为目标都变得很直观。当以发电成本最小为目标时，首先建立所有机组的耗量特性集合，根据节点筛选结果确定主要关联机组并提取其耗量特性，结合相关约束利用等微增率进行机组间优化。当以系统网损最小为目标时，由于已将全网发电机组出力调整问题转化为各区域发电机组出力调整问题，因此只要各区域网损最小即可。本文以网损最小为目标。相关约束条件包括：

(1) 有功功率平衡条件为

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} + \sum_{j=1}^m P_{AGj} - \sum_{k=1}^l P_{LDk} = 0 \quad (1)$$

式中： P_{Gi} 为常规发电机有功输出功率； P_{AGi} 为风电场有功输出功率； P_{LDk} 是负荷消耗的有功功率。

(2) 发电机组运行极限条件为

$$P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \quad (2)$$

式中： $P_{Gi\min}$ 为发电机运行最小输出有功功率； $P_{Gi\max}$ 为发电机运行最大输出有功功率。

(3) 线路阻塞约束为

$$-P_{l\max} \leq P_l \leq P_{l\max} \quad (3)$$

式中 $P_{l\max}$ 为线路传输功率极限。

(4) 风电场有功输出功率和无功输出功率之间的约束关系

$$Q_w = \frac{r_2^2 + x(x + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_w \quad (4)$$

式中： Q_w 为风电场无功输出功率； P_w 为风电场有功输出功率； $x = x_1 + x_2$ ，其中 x_1 为定子电抗， x_2 为转子电抗； x_m 为励磁电抗； r_2 为转子电阻； s 为滑差^[15]。

求解上述问题的具体过程如下：

(1) 由潮流计算得到初始运行状态。

(2) 由电气剖分信息获取源流路径集合。

(3) 将风电场在线预测信息与超短时预测信息进行比较，确定2者的差值。

(4) 根据步骤(3)确定的节点在源流路径集合中选择主要关联负荷，并确定各相关负荷的功率需求变化。

(5) 根据步骤(4)确定的主要关联负荷节点并结合相关约束在路径集合中确定主要关联机组。

(6) 根据功率平衡原理由各负荷功率需求变化量总和确定各电源初值。

(7) 不断更新各电源值，寻找网络损耗最小的方案并输出。

3 可行性分析

上述电气剖分方法可以准确地寻找到电源与负荷之间的功率传输路径，但是在利用该方法实现风电系统调度时电源输送功率能否按照所期望的路径流向负荷是调度方案是否可行的关键。在讨论可行性时，设负荷预测时的支路如图3所示，实际运行时的支路如图7所示。对图7进行剖分，结果如图8所示。设 $P = P_{1\text{new}} + P_2$ ， $Q = Q_{1\text{new}} + Q_2$ 。其中： $\Delta P'_x = Q(P_2 Q_{1\text{new}} - P_{1\text{new}} Q_2) / (P^2 + Q^2)$ 和 $\Delta Q'_x = (P_2 Q_{1\text{new}} - P_{1\text{new}} Q_2) / (P^2 + Q^2)$ 分别为2条剖分子支路之间的有功与无功交换功率， $\Delta P'_{Bx}$ 和 $\Delta Q'_{Bx}$ 和节点电源交换功率 $\Delta P'_{Gx}$ 、 $\Delta Q'_{Gx}$ ； $Z_{T1\text{new}} = Z_T P / (P_{1\text{new}} + \Delta P'_x)$ 和 Z_{T2} 分别为2条剖分子支路的阻抗； $S_{G1\text{new}} = S_{G\text{new}} (P_{1\text{new}} + \Delta P'_x) / P$ 和 S_{G2} 分别为2条剖分子支路的节点电源功率； $S_{BF1\text{new}} = U[(U - U) / Z_{T1\text{new}}]^*$ 和 S_{BF2} 分别为2条剖分子支路的支路功率。假设在实际运行时负荷1的实际值与负荷预测值之间存在的偏差为 $\Delta P = P_{1\text{new}} - P_1$ 、 $\Delta Q = Q_{1\text{new}} - Q_1$ ，

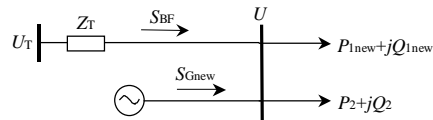


图7 实际运行支路

Fig. 7 Operating branch

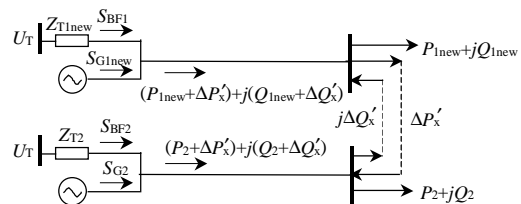


图8 图7的剖分结果

Fig. 8 Result of dissection for Fig. 7

那么在调度时需要调整所接电源的输出功率来实现功率平衡。由实际剖分结果可以看出,流经剖分子支路的实际功率为 $(P_{1new}+\Delta P'_x)+j(Q_{1new}-\Delta Q'_x)$,与预测的流经该子支路功率的差值为 $\Delta P'=\Delta P+(\Delta P'_x-\Delta P_x)$ 、 $\Delta Q'=\Delta Q+(\Delta Q_x-\Delta Q'_x)$ 。 $\Delta P'$ 和 $\Delta Q'$ 由相应的支路功率和节点电源功率组成,而该支路功率的调整又可以通过对与其相联的机组输出功率的调整来实现。以此类推,合理调整相关电源的输出功率就能够满足负荷功率需求偏差的要求。因此,当实际负荷与预测值发生偏差时可以确定其电源供给路径,及时通过调整主要关联机组的发电计划及一次调节和AGC控制进行调峰,以满足系统的功率平衡。当系统中存在风电场时,由于风电场输出功率不稳定,当其预测值与实际值出现偏差时会造成其供电负荷的功率缺失(或过剩),此时可以将该问题转化为对其供电负荷的其他供电电源进行调整,从而使问题简单化、清晰化。

4 算例分析

以修改后的IEEE14节点系统为例进行分析,如图9所示。其中节点1、2、6、8接有常规机组,节点3接风电场,风电场异步风电机组的参数取自文献[16]。该风电场的当前在线调度时段预测输出功率为 $0.4-j0.2$ (以下数据不加说明均为标么值),该时段的某一超短时段风电场的预测输出功率为 $0.2-j0.1$ 。节点3的有功负荷功率为0.942。

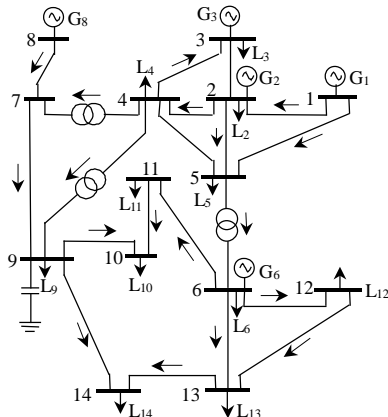


图9 IEEE14节点系统
Fig. 9 IEEE 14-bus system

各机组的初始输出功率见表1。根据当前在线调度时间段的初始运行状态对网络进行电气剖分,得到全网剖分情况及源流路径集。主要关联负荷及主要关联机组的源流路径情况见表2。现已知节点3处风电场的某一超短时段的输出功率为 $0.2-j0.1$,

表1 各机组初始有功输出功率

Tab. 1 Original output of each generator

电源节点	1	2	3	6	8
输出功率/pu	1.882 9	0.4	0.4	0	0

表2 系统当前在线调度时段初始剖分结果

Tab. 2 Result of dissection of original system

节点	剖分路径	剖分线路阻抗/pu	剖分线路功率/pu
3	3-3	—	0.4-j0.2
1	1-2-3	0.11+j0.39	0.121+j0.172
1	1-2-4-3	2.002+j6.06	0.368-j0.012
1	1-5-4-3	2.009+j7.987	0.007+j0.011
1	1-2-5-4-3	4.784+j14.495	0.021-j0.001
2	2-3	0.047+j0.198	0.017-j0.001
2	2-4-3	0.976+j2.928	0.002+j0.004
2	2-5-4-3	2.103+j6.409	0.007-j0.000
有功合计	—	—	0.943

输出有功功率比预测值少 0.2,造成负荷 3 功率缺少 0.2。由表 2 可知,负荷 3 的主要关联机组为 1 号和 2 号机组,其中负荷 3 从 3 号风电场共吸收功率 $0.4-j0.2$,从 1 号机组共吸收功率 $0.52+j0.17$,从 2 号机组共吸收功率 $0.027+j0.003$,具体供电路径已知,这样即可通过调节 1、2 号机组的输出功率来对负荷 3 进行有功功率补偿。

在超短时段对 1、2 号机组输出功率的调整方案如下:

(1) 不考虑约束条件。

在无约束的情况下,由 2 号机组提供有功功率 0.2 补偿负荷 3 时的网损最小。经过优化调整,该超短时段各机组输出功率见表 3,具体供电路径、阻抗及功率分布情况见表 4,可见负荷 3 从 3 号风电场共吸收功率 $0.2-j0.1$,从 1 号机组共吸收功率 $0.508-j0.009$,从 2 号机组共吸收功率 $0.234+j0.194$ 。

表3 无约束时的各机组有功输出功率

Tab. 3 Output of each generator without constraints

电源节点	1	2	3	6	8
输出功率/pu	1.893 2	0.6	0.2	0	0

表4 无约束时机组优化后的系统剖分结果

Tab. 4 Result of dissection for optimization without constraints

节点	剖分路径	剖分线路阻抗/pu	剖分线路功率/pu
3	3-3	—	0.2-j0.1
1	1-2-3	0.106+j0.377	0.399-j0.012
1	1-2-4-3	1.019+j3.069	0.046-j0.001
1	1-5-4-3	0.969+j3.795	0.044-j0.001
1	1-2-5-4-3	2.305+j7.016	0.019-j0.001
2	2-3	0.047+j0.198	0.199+j0.167
2	2-4-3	0.505+j1.499	0.026+j0.019
2	2-5-4-3	1.012+j3.066	0.009+j0.008
有功合计	—	—	0.942

(2) 考虑约束条件。

表 5 是风电场相关电源和线路的约束情况。为解决线路阻塞问题, 可以通过优先调整与 2 号机组所接次要关联负荷相连的次要关联机组的输出功率来减轻阻塞情况, 表 6 是 2 号、6 号机组相关负荷列表, 可见系统中除节点 3 外, 2 号机组和 6 号机组共同为负荷 6、10~14 供电, 因而优先调整 6 号机组的输出功率。对 6 号机组的调整仍然是在一个确定的小区域内, 因而并没有使问题复杂化。

表 5 风电场相关电源和线路的约束情况

Tab. 5 Constraints of electrical source and line related to wind farm

节点或线路	下限/pu	上限/pu
2	0	0.55
2-5	-0.4	0.4

表 6 2 号、6 号机组供电负荷列表

Tab. 6 List of loads for generator 2 and 6

电源节点	供电负荷节点
2	2—3, 6, 9—14
6	6, 10—14

在考虑约束之后对各机组输出功率进行调整, 表 7 是综合考虑约束后的各机组输出功率情况。由于增加了 6 号机组的输出功率, 2 号机组对负荷 6、10—14 的供电功率下降, 使得线路 2-5 的阻塞情况得到缓解, 调整后的传输功率为 0.3915, 低于线路传输极限, 从而保证了 2 号机组对负荷 3 的有功功率补偿。表 8 是考虑约束情况时风电系统预调度后的相关源流路径, 其中负荷 3 从 3 号风电场共吸收功率 $0.2-j0.1$, 从 1 号机组共吸收功率 $0.52+j0.18$, 从 2 号机组共吸收功率 $0.222+j0.193$ 。

综合表 1、3 和 7 可以看出, 当系统中风电场输出功率的预测值出现偏差时, 利用电气剖分方法

表 7 考虑约束后的各机组有功输出功率

Tab. 7 Output of each generator with constraints

电源节点	1	2	3	6	8
输出功率/pu	1.8374	0.55	0.2	0.1	0

表 8 考虑约束时机组优化后的剖分结果

Tab. 8 Result of dissection of optimization with constraints

节点	剖分路径	剖分线路阻抗/pu	剖分线路功率/pu
3	3-3	—	$0.2-j0.1$
1	1-2-3	$0.104+j0.373$	$0.399-j0.013$
1	1-2-4-3	$0.926+j2.787$	$0.049-j0.002$
1	1-5-4-3	$0.827+j3.221$	$0.049-j0.002$
1	1-2-5-4-3	$1.982+j6.026$	$0.023-j0.001$
2	2-3	$0.047+j0.198$	$0.187+j0.165$
2	2-4-3	$0.459+j1.362$	$0.025+j0.02$
2	2-5-4-3	$0.863+j2.612$	$0.01+j0.008$
有功合计	—	—	0.942

可以及时找到问题关键点, 从而将全网调度问题转化为一个小区域范围内的调度问题, 并且在进行相应优化调整后能够很好地满足系统功率平衡要求。

5 结论

电气剖分方法可以确定电源和负荷之间的供电关系, 进而确定主要关联机组, 结合系统相关约束对这些电源的出力进行调整即可实现风电系统的调度。本文提出的方法能够将全网调度问题有效地转化为多个小区域调度问题, 从而使问题得到简化。另外, 本文方法能够准确地对与风电场关系最紧密的主要关联机组进行调节和控制, 从而及时地跟踪并补偿由风电场引起的系统功率缺失(或过剩)。

参考文献

- 李俊峰. 风力 12 在中国[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
Lei Yazhou. Study on wind farm integration into power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89(in Chinese).
- Contaxis G C, Kabouris J. Short term scheduling in a wind/diesel autonomous energy system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 1161-1167.
- 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
Chen Haiyan, Chen Jinfu, Duan Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 22-26(in Chinese).
- 陈金富, 陈海焱, 段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 31-35.
Chen Jinfu, Chen Haiyan, Duan Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35(in Chinese).
- Dialynas E N. Effect of high wind power penetration on the reliability and security of isolated power system[C]. IEE Colloquium on Small Wind Power Systems, London, UK, 1996.
- 魏萍, 倪以信, 吴复立, 等. 基于图论的输电线路功率组成和发电机与负荷间功率输送关系的快速分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 21-29.
Wei Ping, Ni Yixin, Wu Fuli, et al. Power transfer allocation for open access using graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 21-29(in Chinese).
- Wei Ping, Yuan Bin, Ni Yixin, et al. Power flow tracing for transmission open access[C]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, London, 2000.
- 谢开贵, 李春燕, 赵渊, 等. 电力系统功率分配的解析模型和算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 27-31.

(下转第 59 页 continued on page 59)

