

# 风力发电机供电路径解析分析

刘苑红, 鲍海

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

## Analytic Analysis on Power Supply Path of Wind Power Generation

LIU Yuanhong, BAO Hai

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,  
Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** In view of the randomness and intermittence of wind energy, the output of wind power generators fluctuates randomly and it makes the dispatching of power network in trouble. In order to maintain power system stability, it is of significance to obtain the concrete position and supply path, where the power insufficiency due to output variation of wind power occurs, so that the operation mode of power network can be adjusted in time. In allusion to this problem, based on the theory of power distribution in power network an analytic method is proposed to rapidly search power supply path of wind farm in power network and to implement emergent dispatching. The main thinking of the proposed method is that: under the presupposition of ensure the equivalence of power transmission, by means of decomposing the power network containing wind farm into a parallel transmission network containing multi single power sources to determine the sub-network of wind farm. The analytic analysis on power-transferring relation between arbitrary two nodes in the sub-network is performed, thus the power supply path of wind farm is obtained.

**KEY WORDS:** wind farm; power distribution; transferring relation; power supply path; analytic analysis

**摘要:** 由于风能具有随机性和间歇性, 风力发电机组的输出功率随机波动, 电网调度困难。得到风电出力变化所引起的功率缺失的具体位置和传输路径, 及时调整运行方式, 对于维持系统稳定有着重大的意义。针对此问题, 基于电网络功率分布理论, 提出了一种快速搜索网络中风电源供电路径的解析方法, 以实现紧急调度。该方法主要思想是在传输等效前提下, 通过将含风电源网络分解成多个单电源并联传输网络, 确定风电源子网络。对子网络中任意 2 个节点之间的功率传递关系进行解析分析, 得到了风电源供电路径。

**关键词:** 风电场; 功率分布; 传递关系; 供电路径; 解析分析

## 0 引言

风力发电是一种特殊的电力, 它的原动力是风

能。风速和风向随机变化, 发电机输出功率也随机波动<sup>[1]</sup>。因此, 研究分析风电源是通过哪几条路径供给哪几个负荷功率以及负荷是通过哪几条路径从风电源处吸收功率, 确定系统中功率缺失的具体位置, 对于维持电力系统的实时平衡有重大意义<sup>[2-3]</sup>。

文献[4-10]对于电力网络源流关系已有一定的研究。传统方法大都基于比例共享原则, 并通过潮流跟踪方法来获取源流之间功率的供给关系。然而该原则是一个难以严格证明的原理, 在实际应用时, 有其存在条件和使用范围, 对于许多问题会失效或产生较大偏差<sup>[11]</sup>。文献[12-14]在遵循电气基本原理的基础上将各支路和节点进行电气剖分, 得到网络源流沿剖分子路径传输的电气量性质和数量, 但此方法在应用于庞大的电力系统时稍显繁杂。文献[15-16]根据电路的基本理论, 从功率分量角度分析了电源功率在电网络各处的分布情况, 得到了多电源在电网络任意节点和支路功率分布的解析表达式, 提出各功率分量是各自按照网络独立线性分布的, 揭示了多电源网络功率的组成和分布的本质。

本文以电力网络功率分布理论为基础, 提出一种快速准确搜索网络中各电源注入功率单独传输路径信息的解析方法。该方法主要思想是: 在满足传输等效条件下, 通过将多电源网络分解成多个单电源并联传输网络, 得到具有自身网络结构及其参数的各等效单电源子网络。然后对各等效单电源子网络, 采用解析的方法推导出网络中任意 2 个节点之间的功率传递关系, 从而构建出网络供电路径。

## 1 含风力发电机网络功率的分解

### 1.1 电网节点电压方程

设电网络具有  $n$  个节点,  $q$  个电源; 风电源节

点编号为 1, 其余电源节点编号从 2 开始, 依次到  $q$ 。当电网潮流确定后, 可以将电网络等效为电路网络, 其中电源以电流源形式  $\dot{I}_{ks}$  来描述,  $k=1\sim q$ ; 负荷等效为阻抗并入网络。

电网的节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1q} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2q} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \cdots & Z_{qq} & \cdots & Z_{qn} \\ Z_{(q+1)1} & Z_{(q+1)2} & \cdots & Z_{(q+1)q} & \cdots & Z_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nq} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1s} \\ \dot{I}_{2s} \\ \vdots \\ \dot{I}_{qs} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_q \\ \dot{U}_{q+1} \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

可以得出

$$\dot{U}_i = \sum_{k=1}^q Z_{ik} \dot{I}_{ks}, \quad i=1\sim n \quad (2)$$

式中:  $Z_{ik}$  为电网络节点阻抗矩阵中的元素;  $\dot{U}_i$  为第  $i$  个节点的电压;  $\dot{I}_{ks}$  为第  $k$  个电源的电流。

### 1.2 任意两节点间支路的功率

根据电路基本理论, 网络中第  $k(k \leq q)$  个电源发出的功率为

$$\dot{S}_{ks} = \dot{U}_k \dot{I}_{ks}^* = \sum_{m=1}^q Z_{km} \dot{I}_{ms} \dot{I}_{ks}^* \quad (3)$$

理想源的端口功率完全由其自己输出并不含有其他电源的功率成分。因此, 定义  $Z_{km} \dot{I}_{ms} \dot{I}_{ks}^*$  形式的功率成分为功率分量, 其中  $m \leq q, k \leq q$ , 它表示由于电源  $m$  和  $k$  在网络中同时作用由电源  $k$  发出的功率<sup>[15]</sup>。由上述可得, 流过  $i-j$  支路的电流为

$$\dot{I}_{ij} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j) / Z_{ij} = [(Z_{1i} - Z_{1j}) \dot{I}_{1s} + (Z_{2i} - Z_{2j}) \dot{I}_{2s} + \cdots + (Z_{qi} - Z_{qj}) \dot{I}_{qs}] / Z_{ij} \quad (4)$$

式中  $Z_{ij}$  为  $i-j$  支路阻抗。由节点  $i$  向节点  $j$  注入的支路功率为

$$\dot{S}_{ij} = \dot{U}_i \dot{I}_{ij}^* = [Z_{1i} \dot{I}_{1s} + Z_{2i} \dot{I}_{2s} + \cdots + Z_{qi} \dot{I}_{qs}] \cdot [(Z_{1i} - Z_{1j}) \dot{I}_{1s} + (Z_{2i} - Z_{2j}) \dot{I}_{2s} + \cdots + (Z_{qi} - Z_{qj}) \dot{I}_{qs}]^* / Z_{ij}^* \quad (5)$$

### 1.3 各功率分量归属分析

从式(4)(5)可以看出, 联络支路功率为所有电源提供的功率分量之和。由上文功率分量的定义可知, 在联络线支路  $i-j$  传输功率  $\dot{S}_{ij}$  中, 由电源  $k$  提供的功率为

$$\dot{S}_{ij}^{(k)} = \frac{1}{Z_{ij}^*} \sum_{m=1}^q Z_{im} (Z_{ik} - Z_{jk})^* \dot{I}_{ms} \dot{I}_{ks}^*, \quad i=1\sim n, j=1\sim n \quad (6)$$

## 2 风力发电机供电路径解析

### 2.1 含风力发电机网络的等效分解

当电力网络结构及其参数确定后, 系统的状态也随之确定。但它只能提供多个电源共同作用下节

点和支路的电压、电流或功率等常规电气信息, 很难准确得到各电源在网络中的传输路径信息。

选式(1)网络中某一简单支路模型, 如图 1 所示。假设各电源之间并联传输, 其模型如图 2 所示。图中:  $\dot{U}_i$ 、 $\dot{U}_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压;  $\dot{S}_{ij}$  为注入  $i-j$  支路功率;  $Z_{ij}$  为  $i-j$  支路阻抗;  $Z_{ij}^{(k)}$  为第  $k$  个电源所对应的  $i-j$  支路等效阻抗。

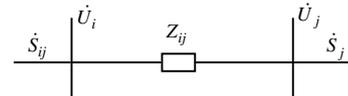


图 1 含风电源网络中某简单支路模型

Fig. 1 A simple branch of the wind power network

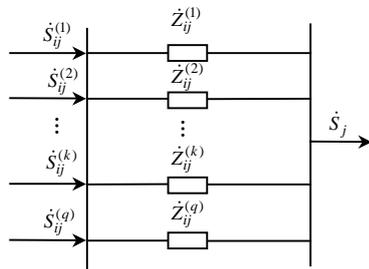


图 2 各电源并联传输模型

Fig. 2 Parallel branch model

等效分解传输功率的前提需保证传输等效, 即支路流出总功率  $\dot{S}_j$  不变, 节点电压  $\dot{U}_i$ 、 $\dot{U}_j$  保持不变, 电源注入节点  $i$  的总功率不变, 即

$$\dot{S}_{ij} = \dot{S}_{ij}^{(1)} + \dot{S}_{ij}^{(2)} + \cdots + \dot{S}_{ij}^{(k)} + \cdots + \dot{S}_{ij}^{(q)}$$

以上述条件为前提, 则第  $k$  个电源在  $i-j$  支路所引起的电流为

$$\dot{I}_{ij}^{(k)} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j) / Z_{ij}^{(k)} \quad (7)$$

第  $k$  个电源注入  $i-j$  支路功率为

$$\dot{S}_{ij}^{(k)} = \dot{U}_i \dot{I}_{ij}^{(k)*} = \dot{U}_i (\dot{U}_i - \dot{U}_j)^* / Z_{ij}^{(k)*} \quad (8)$$

第  $k$  个电源对应的  $i-j$  支路等效阻抗为

$$Z_{ij}^{(k)} = \dot{U}_i^* (\dot{U}_i - \dot{U}_j) / \dot{S}_{ij}^{(k)*} \quad (9)$$

同理, 可以对负荷对地支路进行等效分解。

由式(7)~(9)可推得

$$\frac{1}{Z_{ij}} = \frac{1}{Z_{ij}^{(1)}} + \frac{1}{Z_{ij}^{(2)}} + \cdots + \frac{1}{Z_{ij}^{(q)}} \quad (10)$$

式(10)表明, 各电源在  $i-j$  支路中对应于各自等效阻抗并联传输, 即上述 2 个模型是等效的<sup>[17]</sup>。

### 2.2 风电源网络分析

仅含风电源的电力网络各节点电压表示为

$$\dot{U}_i = Z_{1i} \dot{I}_{s1} \quad (11)$$

电源总注入功率为

$$\dot{S}_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_{s1}^* = Z_{11} \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* \quad (12)$$

节点  $i$  对地负荷功率为

$$\dot{S}_{Li} = \dot{U}_i \dot{I}_{Li}^* = Z_{Li} \dot{I}_{s1} \left( \frac{\dot{U}_i}{Z_{Li}} \right)^* = \frac{|Z_{Li}|^2}{Z_{Li}^*} \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* \quad (13)$$

风电源注入  $i-j$  支路的传输功率为

$$\dot{S}_{ij} = \dot{U}_i \dot{I}_{ij}^* = Z_{Li} \dot{I}_{s1} \left( \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{Z_{ij}} \right)^* = Z_{Li} (Z_{Li} - Z_{Lj})^* \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* / Z_{ij}^* \quad (14)$$

基于式(11)–(14)可建立网络中任意 2 个节点之间的功率传递解析关系。系统中 2 种较为关注的关系是电源负荷功率传递关系  $A_{s\_Li}$  和电源支路功率传递关系  $A_{s\_ij}$ ，分别为

$$A_{s\_Li} = \dot{S}_{Li} / \dot{S}_1 = |Z_{Li}|^2 / (Z_{L1} Z_{Li}^*) \quad (15)$$

$$A_{s\_ij} = \dot{S}_{ij} / \dot{S}_1 = Z_{Li} (Z_{Li} - Z_{Lj})^* / (Z_{L1} Z_{ij}^*) \quad (16)$$

式(15)(16)表明，在潮流断面确定的情况下，电源功率与负荷功率、支路功率之间的传递关系只与电力网络结构及其参数有关，与电源注入无关。若电源功率已知，则可快速准确地得到网络中其余各点功率。

### 3 算例分析

风电场经过变压器和线路接入 IEEE3 机 9 节点系统 8 号节点，设其注入该系统有功功率为 0.2 pu，如图 3 所示。图中： $G_1$ — $G_4$  为发电机； $B_1$ — $B_{10}$  为母线。

首先对该系统进行潮流计算。潮流确定后，发电机等效成电流源，负荷等效成对地阻抗，按照式(3)(9)等效分解后，得到 4 个单电源网络。各单电源网络对应的支路等效阻抗如表 1 所示。

为验证等效的正确性，根据式(10)，将各单电源等效阻抗进行合成，并与原网络对应支路阻抗进行比较，结果如表 2 所示。

除去计算误差外，原网络支路阻抗与各单电源网络等效阻抗合成值是一致的。根据表 1 中  $G_4$ (风电源)对应的各支路、负荷等效阻抗，求得该单电源

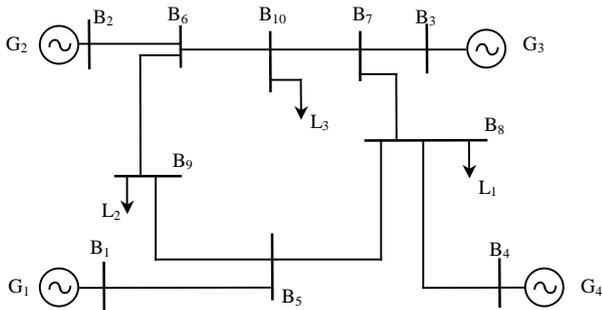


图 3 风电系统结构

Fig. 3 Structure of the wind power system

表 1 各单电源网络的支路等效阻抗  
Tab. 1 Equivalent branch impedances of the single power network

支路	$G_1$ /pu	$G_2$ /pu	$G_3$ /pu	$G_4$ /pu
B <sub>4</sub> -B <sub>8</sub>	-6.781 1-	-3.561 3-	-6.859 3	0.027 0+
	j7.194 2	j0.911 7	-j0.931 8	j0.092 9
B <sub>7</sub> -B <sub>8</sub>	0.152 2-	0.038 9+	0.079 5+	-1.058 8-
	j1.019 3	j0.297 9	j0.242 9	j0.977 7
B <sub>5</sub> -B <sub>8</sub>	0.038 7+	0.137 6+	-0.124 8-	-0.199 3-
	j0.062 5	j0.049 2	j0.056 1	j0.014 1
B <sub>5</sub> -B <sub>9</sub>	0.019 8+	-0.247 1	0.157 8+	0.381 0+
	j0.123 7	-j0.014 2	j0.233 1	j0.180 4
B <sub>7</sub> -B <sub>10</sub>	-0.114 2+	-0.078 2	0.042 3+	0.355 4+
	j0.311 1	-j0.054 1	j0.053 1	j0.294 4
B <sub>6</sub> -B <sub>9</sub>	0.165 7	0.038 9+	0.037+	-11.475 3+
	-j1.485 8	j0.181 5	j0.734 3	j2.088 8
B <sub>6</sub> -B <sub>10</sub>	-0.308 5+	0.023 2+	-0.112 5-	-1.830 0+
	j0.503 7	j0.059 3	j0.263 0	j6.837 3
B <sub>8</sub> 对地支路	3.012 8+	1.511 7+	2.873 7+	10.168 9-
	j2.775 4	j0.173 3	j0.401 2	j2.436 1
B <sub>9</sub> 对地支路	5.009 3+	2.210 7+	4.137 1-	11.792 3-
	j3.202 1	j0.009 8	j0.461 8	j8.332 3
B <sub>10</sub> 对地支路	3.354 4+	1.926 2+	3.618 4+	13.462 3-
	j4.294 4	j0.084 3	j0.104 7	j2.304 8

表 2 原网络支路阻抗与等效合成阻抗的比较  
Tab. 2 Branch resistances of the original network compared with the equivalent synthetic one

支路 $i-j$	原网络支路阻抗/pu	各单电源合成阻抗/pu
B <sub>4</sub> -B <sub>8</sub>	0.023 8+j0.096 5	0.023 8+j0.096 5
B <sub>7</sub> -B <sub>8</sub>	0.039 0+j0.170 0	0.039 0+j0.170 0
B <sub>5</sub> -B <sub>8</sub>	0.017 0+j0.092 0	0.017 0+j0.092 0
B <sub>5</sub> -B <sub>9</sub>	0.010 0+j0.085 0	0.010 0+j0.085 0
B <sub>7</sub> -B <sub>10</sub>	0.012 0+j0.101 0	0.012 0+j0.101 0
B <sub>6</sub> -B <sub>9</sub>	0.032 0+j0.161 0	0.032 0+j0.161 0
B <sub>6</sub> -B <sub>10</sub>	0.019 0+j0.072 0	0.019 0+j0.072 0
B <sub>8</sub> 对地支路	0.756 2+j0.158 5	0.756 0+j0.158 5
B <sub>9</sub> 对地支路	1.123 5+j0.032 9	1.123 3+j0.032 9
B <sub>10</sub> 对地支路	0.993 5+j0.165 2	0.993 3+j0.165 2

网络节点阻抗阵，风电源网络中各节点功率传递关系如表 3 所示。表中： $A_{G4s\_i-j}$  表示在  $G_4$  子网络中节点  $i$  到  $j$  的有功功率传递系数； $A_{G4s\_Li}$  表示  $G_4$  对

表 3 风电源与网络中各点处的功率传递系数  
Tab. 3 Power transmission coefficients between the power and the point of the network

传递系数	传递系数值
$A_{G4s\_4-8}$	-0.005 8+j0.021 9
$A_{G4s\_7-8}$	-0.008 0-j0.027 3
$A_{G4s\_5-8}$	-0.006 6-j0.004 6
$A_{G4s\_5-9}$	0.009 7+j0.014 5
$A_{G4s\_7-10}$	0.003 1+j0.008 7
$A_{G4s\_6-9}$	-0.007 1-j0.002 7
$A_{G4s\_6-10}$	-0.001 3+j0.001 2
$A_{G4s\_L1}$	0.385 9+j0.121 6
$A_{G4s\_L2}$	0.299 4-j0.024 4
$A_{G4s\_L3}$	0.298 9+j0.116 1

负荷  $L_i$  的有功功率系数。

各传递系数确定后, 风电源对各负荷供电路径也随之确定, 如图4所示。

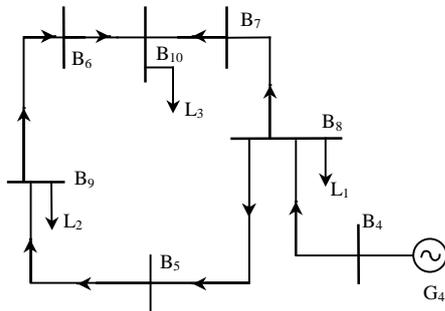


图4 风力发电机供电路径

Fig. 4 Supply path of the wind power

## 4 结论

1) 在含风力发电机的电网络中, 本文分析了线路功率和负荷功率的组成成分, 结合功率分量的电源属性, 得到了线路和负荷各功率分量的电源归属。

2) 在电网络功率分布的基础上, 证明了多电源网络传输模型可以等效分解成多个单电源网络并联传输模型。

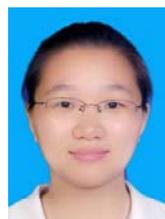
3) 对于风电源网络, 解析描述了风电源功率与支路传输功率、负荷功率之间的复比例传递关系, 确定了风力发电机供电路径。

## 参考文献

- [1] Chen Z, Spooner E. Grid power quality with variable speed wind turbines [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001, 16(2): 83-87.
- [2] 陈宁, 于继来. 基于电气剖分信息的风电系统有功调度与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 51-58.  
Chen Ning, Yu Jilai. Active power dispatch and regulation of wind power system based on electrical dissecting information of electric power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 51-58(in Chinese).
- [3] 常乃超, 郭志忠. 网损分摊问题的思考[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 43-47.  
Chang Naichao, Guo Zhizhong. Pondering of the loss allocation problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 43-47(in Chinese).
- [4] Kirschen D, Allan R, Strbac G. Tracing active and reactive power between generators and loads using real and complex currents[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 1312-1318.
- [5] Bialek J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings-C, 1996, 143(2): 405-412.
- [6] 彭建春, 江辉, 成连生. 复功率电源的支路功率分量理论[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 1-4.  
Peng Jianchun, Jiang Hui, Cheng Liansheng. Theory of branch complex power components induced by individual generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 1-4(in Chinese).
- [7] 伍文城, 张友刚. 基于复功率追踪的网损分配方法探讨[J]. 继电器, 2004, 32(12): 82-86.  
Wu Wencheng, Zhang Yougang. Discussion on the methods for loss

allocation using complex power tracing[J]. Relay, 2004, 32(12): 82-86(in Chinese).

- [8] 王秀丽, 王锡凡. 利用电流的实部与虚部分量进行复功率追踪[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 10-13,23.  
Wang Xiuli, Wang Xifan. Complex power flow tracing via real and imaginary current components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 10-13,23(in Chinese).
- [9] 吴政球. 非线性函数值贡献因子理论及其应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 25(11): 32-34.  
Wu Zhengqiu. Contribution factor theory on variables to the nonlinear function value and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 25(11): 32-34(in Chinese).
- [10] 吴杰康, 李月华. 负荷转移因子及其在网损计算中的应用[J]. 现代电力, 2008, 25(3): 8-12.  
Wu Jiekang, Li Yuehuang. Calculation and application of load shift factor of power systems[J]. Modern Electricity, 2008, 25(3): 8-12(in Chinese).
- [11] 汤奕, 于继来, 周苏荃. 电力网络源流路径电气剖分算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 28-33.  
Tang Yi, Yu Jilai, Zhou Suquan. Electrical dissection algorithm of electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 28-33(in Chinese).
- [12] 于继来, 柳焯. 交流支路的电气剖分方法: (一)普通支路的剖分[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 22-28.  
Yu Jilai, Liu Zhuo. Electrical dissecting method of AC branch part I: dissecting of ordinary branch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 22-28(in Chinese).
- [13] 汤奕, 于继来, 刘宪林. 交流支路的电气剖分方法: (二)移相器支路的剖分[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 25-28.  
Tang Yi, Yu Jilai, Liu Xianlin. Electrical dissecting method of AC branch part II: dissecting of phase-shifter's branch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 25-28(in Chinese).
- [14] 于继来, 汤奕. 交流支路和节点的联合电气剖分[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 37-42.  
Yu Jilai, Tang Yi. United electrical dissection of ac branch and bus [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 37-42(in Chinese).
- [15] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 82-86.  
Bao Hai, Ma Qian. Physical distribution mechanism of network loss for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 82-86(in Chinese).
- [16] 李伟, 鲍海, 杨以涵. 基于系数矩阵确定电源与负荷分配关系的一种解析方法[J]. 继电器, 2007, 35(3): 25-28.  
Li Wei, Bao Hai, Yang Yihan. A new analytical method of deriving relation between generators and loads based on factors matrix [J]. Relay, 2007, 35(3): 25-28(in Chinese).
- [17] 刘苑红. 含风力发电机组的网络能量分布特征分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.



刘苑红

收稿日期: 2010-01-04。

作者简介:

刘苑红(1984), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制, E-mail: liuyuanhong2010@163.com;

鲍海(1968), 男, 教授, 主要从事电力系统运行、分析与控制等方面的研究与教学工作。

(责任编辑 杜宁)