

配电网中分布式电源容量补偿方法

曾鸣, 田廓, 李晨, 董全学, 董军

(华北电力大学 能源与电力经济研究咨询中心, 北京市 昌平区 102206)

A Method to Compensate Independent Distributed Generation Capacity in Distribution Network

ZENG Ming, TIAN Kuo, LI Chen, DONG Quanyue, DONG Jun

(Research Advisory Center of Energy and Electricity Economics, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: To bring the superiority of distributed generation (DG) in to full play and incite independent investors to invest in DG, a method to compensate capacity of independent DG in marketing environment is proposed. The incremental value of reliability for consumers at all load-points and the value of saved investment of distribution company to increase capacity of distribution network, which are brought by connecting DG to distribution network, are determined; according to the value generated by connecting DG to distribution network, the compensation that the DG owner obtain as well as the charges that the consumers at load-points and distribution company should pay can be determined. The proposed method can offer economic signals to choose the installation site and decide the capacity of DG for independent investors. The effectiveness of the proposed method is verified by the results of calculation example.

KEY WORDS: distribution network; distributed generation (DG); capacity compensation; economic signal

摘要: 为发挥分布式电源(distributed generation, DG)优势, 激励独立投资者进行 DG 投资, 提出了市场环境下配电网中 DG 的容量补偿方法。确定了 DG 接入配电网给各负荷点带来的可靠性增量价值以及给供电公司带来的配电网扩容投资节省价值, 根据 DG 接入产生价值可确定 DG 所有者获得的补偿、各负荷点用户及供电公司需支付费用。该方法可为 DG 投资者提供 DG 选址和定容的经济信号。算例结果验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网; 分布式电源; 容量补偿; 经济信号

0 引言

目前, 分布式电源(distributed generator, DG)

以其独特的优势得到越来越广泛的应用。研究表明, 2010 年年底新增分布式发电容量将占全球新增发电容量的 20%^[1]。

DG 既可以独立于公共电网直接为少量用户提供电能, 也可以接入配电网, 与公共电网一起共同为用户提供服务。目前普遍认为, DG 具有投资小、损耗低、系统可靠性高、选址容易、效率高、能源种类多样等优点^[2]。随着 DG 在配电网中的大量接入, 配电网的节点电压、线路潮流、网络可靠性等都会受到影响^[3-8], 且其受影响程度与 DG 接入配电网的位置和容量密切相关。接入电网的 DG 有 2 种建设模式: 1) 由供电公司投资建设; 2) 由独立投资者投资建设, 本文 DG 主要由第 2 种模式建设。供电公司直接投资建设大量的 DG 会造成较大的还本付息压力和运行维护压力, 因此由供电公司直接投资的 DG 容量目前还十分有限, 这使 DG 的优势得不到充分发挥, 不能满足配电网长期发展和稳定运行的要求。为了促进配电网 DG 建设, 有必要激励独立投资者进行 DG 投资。文献[9-11]在配电网规划研究中考虑了 DG 接入后的影响, 分析了配电网中 DG 的最优接入位置和容量, 研究表明考虑 DG 的配网规划能够向独立投资者提供一定的引导信息。文献[12-16]研究了 DG 接入配电网对系统可靠性的影响。

DG 接入配电网主要可以产生 2 方面的收益: 1) 可以改善 DG 附近负荷点的可靠性指标, 使用户受益; 2) 在适当位置接入 DG 能够延缓供电公司对配电网扩容的投资, 使供电公司受益。本文将研究以上 2 方面收益的定量计算方法, 根据“谁受益谁付费”的原则设计符合 DG 特点的容量补偿机

基金项目: 国家自然科学基金项目(70671041, 70771039)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (70671041, 70771039).

制，以激励满足配电网总体规划要求的独立 DG 投资。

1 负荷点可靠性增量价值

传统配电网中，配电网馈线由单一电源点供电，为典型的辐射式供电方式，如图 1 所示， SE_i 为馈线， LP_i 为有用户接入的负荷点。任何一条馈线发生故障将导致馈线之后的负荷点全部停电，严重影响供电安全。DG 接入系统后，发生故障时 DG 附近的负荷点可以按照一定概率划入该 DG 所在的孤岛，实现孤岛运行方式，从而改善各负荷点的供电可靠性^[8,12]。

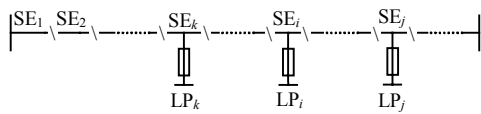


图 1 传统配电线路

Fig. 1 Traditional distribution line

本文采用供电不足期望指标对配电网中各负荷点的供电可靠性进行评估，第 i 个负荷点 LP_i 的可靠性增量价值 I_{RVi} 为

$$I_{RVi} = (E_{ENSBi} - E_{ENSAi})E_i \quad (1)$$

式中： E_{ENSAi} 和 E_{ENSBi} 分别为 DG 接入后与接入前 LP_i 处的供电不足期望指标； E_i 为 LP_i 处的平均停电损失（由于用户对供电可靠性需求不同，停电损失也各不相同）。

由于 LP_i 处的供电不足期望指标等于该负荷点平均负荷需求与 1 a 中该负荷点的期望平均停电时间的乘积，则

$$E_{ENSBi} = L_{av,i} U_{C,i} \quad (2)$$

$$E_{ENSAi} = L_{av,i} U_{L,i} \quad (3)$$

式中： $L_{av,i}$ 为 LP_i 的平均负荷需求，即为 LP_i 的年峰荷与负荷系数的乘积； $U_{C,i}$ 与 $U_{L,i}$ 分别为 DG 接入前后 LP_i 的年期望停电时间。

由于 $U_{C,i} = \lambda_{C,i} r_{C,i}$ ， $U_{L,i} = \lambda_{L,i} r_{L,i}$ ，则

$$E_{ENSBi} = L_{av,i} \lambda_{C,i} r_{C,i} \quad (4)$$

$$E_{ENSAi} = L_{av,i} \lambda_{L,i} r_{L,i} \quad (5)$$

式中： $\lambda_{C,i}$ 与 $r_{C,i}$ 分别为 DG 接入前 LP_i 的故障率和平均故障修复时间； $\lambda_{L,i}$ 与 $r_{L,i}$ 分别为 DG 接入后 LP_i 的故障率和平均故障修复时间。

按照常规配电网可靠性指标计算方法，式(4)中的 $\lambda_{C,i}$ 与 $r_{C,i}$ 可以通过最小割集法求得。式(5)中的 $\lambda_{L,i}$ 与 $r_{L,i}$ 可以根据文献[8]方法求得。最终将式(4)(5)代入式(1)，可得

$$I_{RVi} = L_{av,i} (\lambda_{C,i} r_{C,i} - \lambda_{L,i} r_{L,i}) E_i \quad (6)$$

2 配电网扩容投资节省价值

为保证系统可靠性水平，配电网需要保持一定的传输容量裕度（线路容量极限与峰荷之差）。然而随着用户端负荷的增长，配电网的传输容量裕度会逐渐减小。为保持原有的传输容量裕度，需要对配电网进行扩容。在配电网中合适位置接入适当容量的独立 DG，可以推迟因负荷增长引起的配电网扩容投资，从而给配电网所有者带来经济效益。

将配电网传输容量裕度 (Q_{stan}) 定义为线路容量极限 (Q_{lim}) 与峰荷 (Q_{peak}) 之差，即 $Q_{stan} = Q_{lim} - Q_{peak}$ 。随着负荷增长，配电网中的峰荷增加，会达到一个新的峰荷 Q'_{peak} ，且 $Q'_{peak} < Q_{lim}$ 。此时在配电网中适当位置接入 DG，并将其部分或全部容量 Q_{DG} ($Q_{DG} = Q'_{peak} - Q_{peak}$) 作为配电网备用容量，以抵消负荷增长给配电网可靠性带来的负面影响，在峰荷时段起到削峰作用，从而保持原有传输容量裕度。从整个系统的角度来看，每增加 1 MW 负荷要求需增加 1 MW 的配电系统传输容量。根据长期费用增量概念，采用单位投资成本 (U_{IC}) 计量配电系统传输容量每增加 1 MW 所需的年平均投资成本。长期来看，在同一个配电网中，可采用单位运行成本 (U_{OC}) 计量配电系统传输容量每增加 1 MW 所需的年平均运行费用。

假设随着用户负荷的增长，配电网中的峰荷增加，为保持原来的传输容量裕度，配电网需要扩展的容量 $G_{exp} = G'_{peak} - G_{peak}$ 。因此，如果不接入 DG，配电公司每年由于系统扩容付出的成本为

$$C_{OSTexp} = (U_{IC} + U_{OC}) Q_{exp} = (U_{IC} + U_{OC}) \cdot (Q'_{peak} - Q_{peak}) \quad (7)$$

配电公司每年的配电网扩容投资节省价值为

$$I_{SV} = C_{OSTexp} = (U_{IC} + U_{OC}) (Q'_{peak} - Q_{peak}) \quad (8)$$

3 DG 容量补偿方法

3.1 独立 DG 所有者获得补偿

在符合配电网总体规划的条件下，接入独立 DG 后各负荷点的用户与配电公司是接入独立 DG 的直接受益者。为了有效激励独立投资者对 DG 的投资，本文设计了一种补偿机制，将用户和配电公司获得收益补偿给独立 DG 的投资者。

不管 DG 有无接入，单条馈线上新增 DG 由于 LP_i 供电可靠性改善而应得的补偿价值为

$$C_{RI} = \sum_{i=1}^N I_{RVi} \quad (9)$$

式中 N 为单条馈线上受新增 DG 影响的负荷点总数。将式(6)带入式(9), 可得

$$C_{RI} = \sum_{i=1}^N L_{av,i} (\lambda_{C,i} r_{C,i} - \lambda_{L,i} r_{L,i}) E_i \quad (10)$$

同时需考察独立 DG 接入对电网扩容投资的影响。在一段时间内(该时段内配电网不进行扩容), 供电公司可用于削峰备用的平均 DG 容量为 Q_{DG} , 则

$$I_{SV} = (U_{IC} + U_{OC}) Q_{DG} \quad (11)$$

因此, 因新增 DG 推迟配电网扩容而应得的补偿(C_{EP})等于配电网扩容投资节省价值 I_{SV} , 即

$$C_{EP} = I_{SV} \quad (12)$$

综上所述, 新增独立 DG 所有者应得总补偿为

$$T_C = C_{RI} + C_{EP} \quad (13)$$

3.2 各负荷点用户需支付费用

新建 DG 提高了各负荷点的可靠性, 各负荷点用户的停电损失相应减少。因此 LP_i 的用户向独立 DG 投资者应支付的费用为

$$L_{Ci} = S_{Fi} I_{RVi} \quad (14)$$

式中 S_{Fi} 为配电网公司与负荷点 LP_i 用户之间的分摊系数。 S_{Fi} 由负荷用户与配电网公司之间签订的可中断负荷合同确定, 其取值范围为[0,1]。如果负荷用户与配电网公司签订了完全的可中断负荷合同, 则 $S_{Fi}=0$, 对 DG 投资者的补偿完全由配电网公司承担; 如果负荷用户与配电网公司没有签订可中断负荷合同, 则 $S_{Fi}=1$, 对 DG 投资者的补偿完全由用户承担。需要指出的是以上补偿都按年度支付, 不必计算每 MW 的补偿费用。

3.3 配电网需支付费用

配电网对独立 DG 投资者的付费可以分为 2 部分: 1) 是配电网扩容投资节省价值 I_{SV} ; 2) 是替各负荷点用户 LP_i 分摊的费用(L_{CDC})。因此, 配电网需向独立 DG 投资者支付的补偿费用为

$$D_{CC} = I_{SV} + \sum_{i=1}^N L_{CDCi} = (U_{IC} + U_{OC}) Q_{DG} + \sum_{i=1}^N (1 - S_{Fi}) L_{av,i} (\lambda_{C,i} r_{C,i} - \lambda_{L,i} r_{L,i}) E_i \quad (15)$$

配电网向独立分布式电源投资者的补偿按年度支付, 不必计算每 MW 的补偿费用。

4 算例分析

应用文献[8]给出的含有 DG 的配网测试系统验

证本文所提补偿方法。该测试系统由 7 段馈线、7 个负荷点和 1 个 DG 组成, 如图 2 所示。DG 在馈线段 SE_4 接入, 总发电量为 2 MW, 由 2 台独立的发电机组构成。

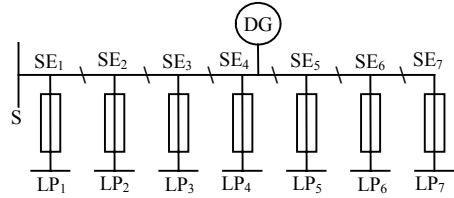


图 2 包含 DG 的配电系统

Fig. 2 Distribution system connected with DG

DG 接入前后各负荷点的可靠性指标如表 1 所示。各负荷点的补偿分配系数 S_{Fi} 、平均停电损失 E_i 、平均负荷水平 $L_{av,i}$ 如表 2 所示。

表 1 DG 接入前后各负荷点的可靠性指标

Tab. 1 Reliability indicators of each load point before/after DG connected to distribution system

i	$\lambda_{C,i}$	$r_{C,i}$	$\lambda_{L,i}$	$r_{L,i}$
1	0.065 000	5.0	0.065 000	5.0
2	0.195 000	10.0	0.194 089	9.93
3	0.390 000	15.0	0.358 395	13.38
4	0.455 000	20.0	0.126 424	7.36
5	0.487 500	25.0	0.158 924	12.36
6	0.552 500	30.0	0.196 555	13.15
7	0.585 000	35.0	0.174 317	13.94

表 2 各负荷点的 S_{Fi} 、 E_i 、 $L_{av,i}$

Tab. 2 S_{Fi} 、 E_i and $L_{av,i}$ of each load point

i	S_{Fi}	E_i /(\bar{J} USD/MW)	$L_{av,i}$ /MW
1	1	0.155	0.310
2	0.3	0.610	0.620
3	0.9	0.263	0.930
4	0.5	0.461	0.310
5	0	0.721	0.155
6	0.5	0.479	0.310
7	0.5	0.380	0.155

各负荷点需要支付的费用 L_{Ci} 以及配电网替各负荷点分担的费用 L_{CDCi} 如表 3 所示。由表 3 可知, 独立 DG 因为改善配电线路可靠性而获得的补贴为 5.717 万 USD。假设配电网单位投资成本 U_{IC} 为 2.73 万 USD/(a·MW)、单位运行成本 U_{OC} 为 0.16 万 USD/(a·MW), 并且配电网指定的 DG 平

表 3 各负荷点的 L_{Ci} 与 L_{CDCi}

Tab. 3 L_{Ci} and L_{CDCi} of each load point

i	L_{Ci} /万 USD	L_{CDCi} /万 USD
1	0.000 000	0.000 000
2	0.002 575	0.006 009
3	0.232 167	0.025 796
4	0.583 753	0.583 753
5	0.000 000	1.142 494
6	1.038 710	1.038 710
7	0.531 426	0.531 426

均削峰备用容量 Q_{DG} 为 2 MW, 因此独立 DG 因为推迟配网扩容投资而获得的补贴 5.78 万 USD。因此, 独立 DG 所有者获得的总补偿为 11.497 万 USD。

在图 2(DG 在馈线段 SE_4 接入)基础上, 更改 DG 的接入位置与接入容量, 进一步分析不同位置的 DG 接入引起补偿费用的差异, 验证本文设计的容量补偿方法的选址引导作用与定容激励作用。

首先验证对 DG 选址的经济引导作用。假设独立 DG 在配电线路中的接入位置发生改变(由在馈线段 SE_4 接入改为在馈线段 SE_1 、 SE_2 、 SE_3 、 SE_4 、 SE_5 接入), 而接入的 DG 容量不变。

由于接入位置发生改变, DG 对各负荷点可靠性的影响也会发生改变, 从而导致获得的经济补偿发生变化。根据本文提出的可靠性价值量化方法, 可以计算出 DG 在不同的馈线段接入时给配电系统带来的可靠性增量价值 C_{RI} 以及所获得的经济补偿 T_C , 如表 4 所示。

表 4 DG 接入不同位置前后各负荷点的可靠性指标
Tab. 4 Reliability indicators of each load point before/after DG connected to distribution system in different position

DG 接入位置	C_{RI} /万 USD	T_C /万 USD
SE_1	1.863	7.643
SE_2	2.019	7.799
SE_3	4.582	10.362
SE_4	5.717	11.497
SE_5	5.813	11.593
SE_6	5.960	11.740
SE_7	5.801	11.581

由表 4 可知, 接入 DG 容量不变时, 在馈线段 SE_6 接入 DG 可以给整个配电系统带来最大的可靠性价值(C_{RI})。因此, 从整个配电系统规划角度来讲, SE_6 是独立 DG 的最佳接入位置。另外根据本文提出的容量补偿方法, 当独立 DG 在馈线段 SE_6 接入时, 投资者可以获得最多的经济补贴(T_C)。因此, 对投资者来说, SE_6 也是独立 DG 接入的最佳位置。这就相当于提供了一个经济信号, 以引导独立 DG 的正确选址, 既能使配电系统获得的可靠性价值最大, 又能使投资者获得的经济补偿最大。

其次验证对 DG 定容的经济激励作用。假设 DG 仍在馈线段 SE_4 接入, 但接入容量减为 1 MW, 供电公司指定的削峰备用容量仍为 2 MW。在其他条件不变的情况下, DG 投资者获得的总补偿为 8.607 万 USD。因此, 由于 DG 接入容量的减少, 独立 DG 投资者获得的经济补偿相应减少。另外,

假设 DG 接入位置不变, 接入容量增加为 3 MW。由于供电公司指定的削峰备用容量仍然为 2 MW, 则 C_{DG} 仍为 2 MW。因此, 独立 DG 投资者获得的经济补贴仍为 11.497 万 USD。而对于投资者来说, 在获得经济补贴没有增加的情况下, 更多的 DG 容量只会带来更多的投资和运行维护成本, 进而使投资者获得的收益减少。因此, 按照供电公司指定的标准(对整个配电系统来说, 供电公司指定的容量是保持配电系统传输可靠性的最优容量)来确定 DG 的容量可以使投资者获利最大化。

上述分析表明, 随着 DG 在配电线路上接入位置的变化, DG 投资者每年获得的补偿也会相应发生变化, 即为投资者提供了一个强烈且明确的经济激励信号, 进而促进合理的 DG 选址。此外, 由于 DG 的削峰备用容量是由供电公司指定的, 这相当于给拟建的 DG 提供了一个定容标准。通过本文提出的容量补偿方法可以看出: 1) 未达到该标准的容量投资是不经济的, 因为其不能使投资者获得补偿最大; 2) 超出该标准的容量投资是无意义的, 因为其不能使投资者获得额外补偿, 这相当于送出了一个经济信号以引导 DG 的合理定容。

5 结论

本文提出了一种电力市场环境下配电网中独立 DG 的容量补偿方法。该方法能够量化独立 DG 给用户带来的可靠性价值以及给供电公司带来的配网扩容投资节省价值; 该方法能够给予 DG 投资者适当的经济补偿, 从而激励投资者按照配电网的统一规划进行 DG 投资; 该方法能够产生一个经济信号, 引导独立 DG 的合理选址和定容。本文方法可为 DG 接入配电网研究提供参考。

参考文献

- [1] Barker pp, DE MELLO R W. Determining the impact of distributed generation on power systems part 1: radial distribution systems [C]/IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA: IEEE, 2000.
- [2] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-76.
Liang Youwei, Hu Zhijian, Chen Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-76(in Chinese).
- [3] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
Liu Yanghua, Wu Zhengqiu, Tu Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76(in Chinese).

- [4] 赵岩, 胡学浩. 分布式发电对配电网电压暂降的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 5-9.
Zhao Yan, Hu Xuehao. Impacts of distributed generation on distribution system voltage sags[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 5-9(in Chinese).
- [5] Ijumba N M, Jimoh A A, Nkabinde M. Influence of distribution generation on distribution network performance[C]//IEEE AFRICON. Capetown: IEEE, 1999.
- [6] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 计及配网静态电压稳定约束的分布式发电规划模型与算法[J]. 电网技术, 2007, 30(21): 11-14.
Chen Haiyan, Duan Xianzhong, Chen Jinfu. Distributed generation planning model and algorithm considering static voltage stability constrain in distribution network[J]. Power System Technology, 2007, 30(21): 11-14(in Chinese).
- [7] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.
Chen Haiyan, Duan Xianzhong, Chen Jinfu. Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40(in Chinese).
- [8] 钱科军, 袁越, 周 Chengke. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 74-78.
Qian Kejun, Yuan Yue, Zhou Chengke. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 74-78(in Chinese).
- [9] Fotuhi-Firuzabad M, Rajabi-Ghahnavie A. An analytical method to consider DG impacts on distribution system reliability[C]//Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Security and Sustainable Development under Deregulation. Dalian, China: IEEE, 2005.
- [10] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.
Wang Chengshan, Chen Kai, Xie Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43(in Chinese).
- [11] 顾承红, 艾芊. 配电网中分布式电源最优布置[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(11): 1896-1900.
Gu Chenghong, Ai Qian. The optimal layout of distributed generation in distribution system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(11): 1896-1900(in Chinese).
- [12] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.
Liu Bo, Zhang Yan, Yang Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108(in Chinese).
- [13] 易新, 陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 50-54.
Yi Xin, Lu Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 50-54(in Chinese).
- [14] 刘传铨, 张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 46-49.
Liu Chanquan, Zhang Yan. Distribution network reliability considering distribution generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 46-49(in Chinese).
- [15] James A M, Robert A S. Distribution system reliability in a deregulated environment: a case study[C]//IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, USA: IEEE, 2003.
- [16] Bae I S, Kim J O, Kim J C, et al. Optimal operating strategy for distributed generation considering hourly reliability worth [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 287-292.



曾鸣

收稿日期: 2010-06-01。

作者简介:

曾鸣(1957), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场与技术经济研究工作, E-mail: zengmingbj@163.com;

田廓(1983), 男, 博士研究生, 从事电力投资与决策分析方面的研究;

李晨(1984), 男, 硕士研究生, 从事分布式发电与需求侧管理方面的研究;

董全学(1968), 男, 博士研究生, 从事电力交易与系统分析方面的研究;

董军(1964), 女, 教授, 主要从事能源经济与输电评价方面的研究工作。

(编辑 徐梅)