

集抄系统中少量测点的潮流计算方法

姜 彤, 彭 谦

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Power Flow Calculation of Measurement-Absence Nodes in Concentrated Meter Reading System

JIANG Tong, PENG Qian

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

ABSTRACT: A poor-measurement power flow calculation method under measurement-absence of partial nodes in concentrated meter reading system is researched. The influence of different positions of measurement-absence node on solvability of power flow calculation is analyzed; a solvability analysis method for network with poor-measurement nodes is proposed and the equations for poor-measurement power flow, which are solved by Newton-Raphson method, are established. Calculation results of IEEE 7-bus system and IEEE 33-bus system validate the correctness of the proposed method.

KEY WORDS: power system; distribution network; power flow algorithm; concentrated meter reading system

摘要: 研究了集抄系统部分节点数据无量测情况下的少量潮流算法, 探讨了无量测节点的不同位置对潮流计算可解的影响, 提出了少量测点网络可解性分析方法。建立了少量测点网络潮流方程, 并采用牛顿-拉夫逊法进行方程解算。7 节点网络和 IEEE33 节点算例验证了所提方法的正确性。

关键词: 电力系统; 配电网; 潮流计算; 集抄系统

0 引言

随着经济建设的快速发展, 人们对电网的要求越来越高, 尤其在供电质量、供电可靠性、工作效率和优质服务等方面提出了更高的要求, 这就需要提高配电网自动化的水平。集抄系统不仅能节约人力资源, 更重要的是还可以提高实时抄表的准确性^[1-2]。

集抄系统通过统一对时可以采集设备安装点相同时刻的有功功率、无功功率、电压等数据。利用这些数据进行网络计算可以得到网络各个采集时刻的运行状态^[3]。由于集抄系统提供的数据对于潮流计算是冗余的, 这在理论上为在配电网中少配

置集抄系统提供了基础。但在网络所有节点上都安装集抄系统会提高生产、运行成本, 因此现场实际运行要求在满足网络计算的前提下尽量少配置集抄系统以节约成本。

通常配电网潮流计算要求每个节点都要有已知的量测量, 如果网络中的某些节点没有任何量测数据, 则不能计算出网络的状态^[4-13]。文献[14-15]中提出用状态估计方法计算量测点缺失时的网络状态, 提出用历史数据作为无量测点的初始数据, 并对初始数据进行加权计算来计算网络状态, 但网架结构的变化与权重的选择会对计算结果产生较大的影响。

本文利用配电网部分节点的冗余数据, 研究配电网存在少量无量测节点时网络可解的条件以及相应的潮流计算方法。

1 含无量测节点的网络多解问题

若要求解 n 个未知数, 必须有只包含这 n 个未知数的线性无关的方程。配网潮流计算的已知量为节点的有功功率、无功功率, 未知量为节点的电压、相角。在关于节点的有功功率、无功功率列写方程时, 如果方程数目与未知数目相等, 那么可以求解出各个节点的电压、相角。

定义: 电压、功率均为已知的节点为 PQU 节点; 电压、功率均未知的节点为 O 节点; 有功功率、无功功率恒为 0 的 PQ 节点为连接节点。

若某个节点为 PQU 节点, 该节点的未知量为相角, 那么对该节点的有功功率、无功功率可以列写两个方程, 方程数目多于未知数目, 则网络可解。因此若网络中存在一个无量测节点, 同时存在两个或两个以上的 PQU 节点, 则网络是可能解出的。

图 1 为一个 7 节点配电网络，假设节点 1 为平衡节点，节点 2、5、6、7 为 PQU 节点，节点 3、4 为 0 节点。

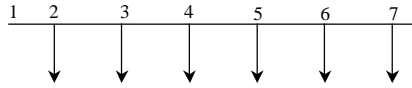


图 1 7 节点配电系统

Fig. 1 Sketch map of 7 nodes distribution network

分析图 1 所示网络，假设节点 2、5、6、7 的相角已知，则节点 2 通过支路 2-3 注入节点 3 的电流已知，节点 4 通过支路 4-5 注入节点 5 的电流也已知。更改节点 3、4 的注入功率可以得到无数组满足网络要求的解，因此网络是不可解的。可见 0 节点在网络中位置的不同会影响网络是否有解，因而有必要分析网络可解的条件。

2 少量测点网络可解性分析

若网络中除平衡节点外的所有节点的注入功率已知，如果网络有解，则该解是唯一的。如果把各个节点的注入功率映射为接入阻抗进行计算，那么该网络的解不发生变化。下面把节点注入功率映射为阻抗进行网络分析。图 2 从左到右依次为 PQ 节点、PQU 节点、0 节点在文中的表示方法。

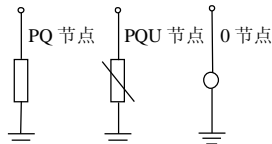


图 2 3 种节点的示意图

Fig. 2 Sketch map of 3 types of node

当网络中存在一个 0 节点时，需要列写两个 PQU 节点方程才能进行计算。图 3 为一个配电网络，其中节点 1 为平衡节点，节点 2 经过一个 0 节点接地，节点 3 连接两个 PQU 节点 4、5。

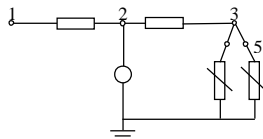


图 3 0 节点位于节点 2 处的配电网络

Fig. 3 Distribution network of node 0 connects to node 2

分析图 3 网络可知，节点 3 与节点 4、5 等电势，因此如果节点 4 的电压幅值已知，则节点 3、5 的电压幅值也为已知。虽然图 3 中给出了节点 4、5 的电压幅值，但对于整个网络来说，只是增加了一个已知条件，方程数目少于未知数目，网络无解。

对于图 3 所示网络，无论节点 3 接入如何复杂的网络，对于网络整体而言，方程数目都是少于未

知数目，网络无解。也就是说，0 节点经过与它相连的连接节点直接接入平衡节点的网络无解。与多个 PQU 节点直接相连的连接节点等价为一个 PQU 节点。

把图 3 网络中的 PQU 节点 4 支路接入节点 2 处，得到图 4。

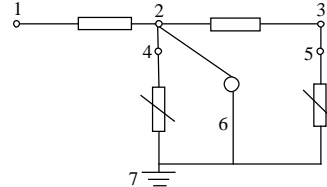


图 4 PQU 节点与 0 节点连接于 2 节点的配电网络

Fig. 4 Distribution network of node 0 and PQU connected to node 2

图 4 中节点 2、3 分别连接一条安装有集抄系统的支路，同时节点 2 还连接一条无量测的支路，节点 1、2、3、4、5 的电压幅值已知。节点 3、5 等电势，取节点 3 为平衡节点，则支路 5-7 电流可解；支路 2-3、5-7 为串联，电流相等，节点 2 电压可解，支路 4-7 电流也可解。任意给定支路 1-2 一组电流值，都可以得到一个与之对应的支路 2-6 的电流值，网络有无数多组解，因此网络不可解。

把图 4 中的 0 节点接于节点 3，得到图 5。

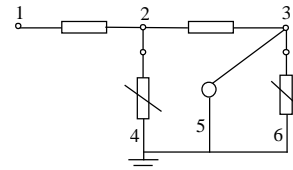


图 5 PQU 节点与 0 节点连接于 3 节点的配电网络

Fig. 5 Distribution network of node 0 and PQU connected to node 3

对节点 2 列写电流方程

$$Y_{12}(\angle_1 - \angle_2) = Y_{24}\angle_2 + Y_{23}(\angle_2 - \angle_3) \quad (1)$$

式中未知量为节点 2、3 的相角，方程数目等于未知量数目，网络可解。

如果网络中含有其它 PQ 节点，对该节点列写方程，方程增加的数目与未知量增加的数目是相同的，因此 PQ 节点的数目不影响网络是否可解。在进行可解性分析时，可以把 PQ 节点的对地电阻视为开路处理，把线路阻抗视为短路处理。这样网络中只保留了平衡节点、PQU 节点、0 节点以及连接节点。把相邻的只与其它连接节点相连的连接节点合并为一个连接节点。

对于只含有一个 0 节点的网络，如果网络中含

有两个连接节点, 其中一个连接节点连接平衡节点及 PQU 节点, 另外一个连接节点连接 0 节点和一个 PQU 节点, 则这个网络可解。

配电网网络中含有多个 0 节点的情况如图 6 所示。

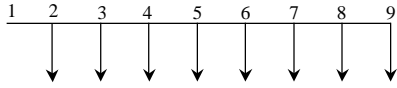


图 6 大型配电网网络图

Fig. 6 Sketch map of large-scale distribution network

图 6 中节点 1 为平衡节点, 节点 2、3、7、9 为 PQU 节点, 节点 4、8 为 0 节点, 节点 5、6 为 PQ 节点。把图 6 所示网络分为两个部分, 节点 1~4 为一部分, 节点 5~9 为另一部分。1~4 部分中连接节点 2 与平衡节点以及一个 PQU 节点相连, 连接节点 4 与 0 节点和一个 PQU 节点相连, 这部分网络可解。虽然节点 4 的注入功率未知, 但是该节点的电压幅值、相角可解, 因此可以把节点 4 视为平衡节点。根据上述分析可知, 节点 5~9 部分网络也为可解的, 则网络整体可解。

对于含有 n 个 0 节点的复杂配电网, 可以得到如下的少量测节点网络可解性分析方法:

- (1) 把网络中所有 PQ 节点按连接节点处理, 线路阻抗按照 0 节点处理。
- (2) 如果两个连接节点相邻, 同时这两个连接节点又只与其它连接节点相连, 那么合并这两个连接节点为一个。
- (3) 分割整体网络为 n 个子部分, 每个子部分中只包含一个 0 节点。
- (4) 如果两个子部分通过联络线路相连, 把联络线两端电势高的节点视为低电势侧子网络的平衡节点进行分析。
- (5) 如果每个子网络中含有两个连接节点, 其中一个连接平衡节点和 PQU 节点, 另外一个连接 0 节点和 PQU 节点, 则网络整体可解。

3 计算方法

图 7 为简化配电网。节点 1 为平衡节点, 节点 4 为 0 节点, 节点 2、3 为 PQU 节点。对节点 2、3 列写节点功率方程

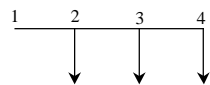


图 7 简化配电网网络图

Fig. 7 Sketch map of mini-scale distribution network

$$\begin{cases} \hat{S}_2 = \hat{U}_2 \sum_{i=1}^3 Y_{2i} \hat{U}_i \angle \theta_i \\ \hat{S}_3 = \hat{U}_3 \sum_{i=2}^4 Y_{3i} \hat{U}_i \angle \theta_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: 视在功率 S_2 、 S_3 , 电压 U_2 、 U_3 为已知量; 电压 U_4 , 相角 q_2 、 q_3 、 q_4 为未知量。方程数目为四个, 未知量数目与方程数目相同, 所以方程是可解的。对式(2)两端求导得到

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_2}{\Delta U_4} & \frac{\Delta P_2}{\Delta d_2} & \frac{\Delta P_2}{\Delta d_3} & \frac{\Delta P_2}{\Delta d_4} \\ \frac{\Delta Q_2}{\Delta U_4} & \frac{\Delta Q_2}{\Delta d_2} & \frac{\Delta Q_2}{\Delta d_3} & \frac{\Delta Q_2}{\Delta d_4} \\ \frac{\Delta P_3}{\Delta U_4} & \frac{\Delta P_3}{\Delta d_2} & \frac{\Delta P_3}{\Delta d_3} & \frac{\Delta P_3}{\Delta d_4} \\ \frac{\Delta Q_3}{\Delta U_4} & \frac{\Delta Q_3}{\Delta d_2} & \frac{\Delta Q_3}{\Delta d_3} & \frac{\Delta Q_3}{\Delta d_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_4 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_3 \\ \Delta d_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

比较式(3)与牛拉法关于节点 2、3、4 行成的雅克比矩阵可以看出, 式(3)为牛拉法关于节点 2、3、4 形成的雅克比矩阵消去 ΔP_4 、 ΔQ_4 所对应的行以及 ΔU_2 、 ΔU_3 所对应的列。

设网络中 i 、 j 点有量测数据, p 、 q 、 u 、 k 点无量测, 则在传统牛拉法雅克比矩阵中消去 ΔP_k 、 ΔQ_k 节点对应的行以及 ΔU_i 、 ΔU_j 对应的列, 方程数目、节点数目各减少两个。

4 算例分析

4.1 7 节点网络算例分析

图 8 为 7 节点网络模型。7 节点网络参数和支路参数分别见表 1、2。

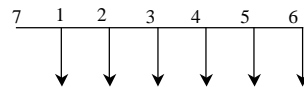


图 8 7 节点配电网网络模型

Fig. 8 7 nodes distribution network model

表 1 7 节点网络参数

Tab. 1 Parameter of 7 nodes network

节点号	节点类型	有功功率/pu	无功功率/pu	电压初值/pu
0	VV	0	0	1.06
1	PQ	-0.01	-0.01	1
2	PQ	-0.01	-0.01	1
3	PQ	-0.01	-0.01	1
4	PQ	-0.01	-0.01	1
5	PQ	-0.01	-0.01	1
6	PQ	-0.01	-0.01	1

表 2 7 节点网络支路参数

Tab. 2 Line parameter of 7 nodes network

支路首	支路尾	电阻/pu	电抗/pu
0	1	0.02	0.08
1	2	0.08	0.25
2	3	0.06	0.2
3	4	0.06	0.23
4	5	0.04	0.15
5	6	0.03	0.12

以图 8 所示网络对本文算法进行验证。取节点 7 为平衡节点进行潮流计算, 计算结果如表 3 所示。以计算结果数据为基础, 模拟集抄系统数据, 分析无量测点位置对潮流计算的影响。节点 3、6 为 0 节点, 节点 1、2、4、5 为 PQU 节点, 计算迭代 6 次收敛, 结果如表 4 所示。

表 3 7 节点网络潮流计算结果

Tab. 3 Result of 7 nodes network power flow calculation

节点号	7	1	2	3	4	5	6
电压/pu	1.06	1.054 1	1.037 9	1.027 6	1.019	1.015 3	1.013 8
相角/(°)	0	-0.185 1	-0.629 7	-0.930 3	-1.209 3	-1.331 2	-1.381 3

表 4 节点 3、6 无量测潮流计算结果

Tab. 4 Result of power flow calculation that node 3 and node 6 have no data

节点号	7	1	2	3	4	5	6
电压/pu	1.06	1.054 1	1.037 9	1.027 6	1.019	1.015 3	1.013 8
相角/(°)	0	-0.185 1	-0.629 7	-0.930 3	-1.209 5	-1.331 4	-1.381 6

比较表 3 与表 4 中的计算结果可知, 在保留 4 位有效数字时, 少点潮流计算时的计算结果电压幅值没有误差, 节点 4、5、6 的相角有不超过 0.0002° 的偏差, 可见该算法是可靠的。

调整两个 0 节点的位置进行计算, 计算收敛情况如表 5 所示。

表 5 调整 0 节点后的结果

Tab. 5 Result of adjusting 0 node

0 节点位置	1	2、3	2、4	2、5	2、6	3、4	3、5	3、6
收敛情况	发散	发散	发散	收敛	收敛	发散	发散	收敛

分析表 5 中的计算结果可知, 少量测点网络可解性分析方法是正确的。

4.2 IEEE 33 节点网络算例分析

对文献[16]中的 IEEE 33 节点的配电网进行计算, 网络拓扑结构如图 9 所示。

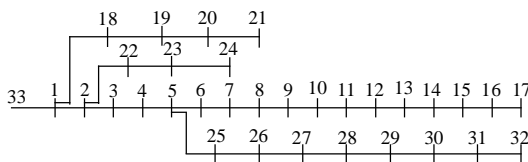


图 9 IEEE 33 配电网络图

Fig. 9 Network map of IEEE 33 distribution network

取功率基准值为 100 MVA, 电压基准值为 10kV, 节点 33 为平衡节点进行潮流计算, 计算结果如表 6 所示。

表 6 IEEE 33 网络潮流计算结果

Tab. 6 Result of IEEE 33 distribution network power flow calculation

节点	电压幅值/pu	电压相角/(°)	节点	电压幅值/pu	电压相角/(°)
33	1.000 0	0.000 0	17	0.852 5	-0.888 5
1	0.995 0	0.024 6	18	0.994 2	0.007 2
2	0.971 4	0.164 4	19	0.988 4	-0.100 9
3	0.958 8	0.277 9	20	0.987 3	-0.132 2
4	0.946 2	0.394 7	21	0.986 3	-0.165 2
5	0.915 0	0.232 8	22	0.965 6	0.113 6
6	0.909 1	-0.171 1	23	0.954 7	-0.033 4
7	0.900 8	-0.106 0	24	0.949 2	-0.106 3
8	0.890 1	-0.234 4	25	0.911 7	0.302 0
9	0.880 2	-0.345 3	26	0.907 3	0.400 7
10	0.878 7	-0.332 1	27	0.887 8	0.545 6
11	0.876 2	-0.310 9	28	0.873 8	0.684 1
12	0.865 7	-0.475 1	29	0.867 7	0.874 3
13	0.861 8	-0.618 1	30	0.860 6	0.721 0
14	0.859 4	-0.686 8	31	0.859 0	0.679 0
15	0.857 1	-0.729 2	32	0.858 5	0.664 8
16	0.853 6	-0.870 9			

取图 5 中节点 17 为 0 节点, 节点 15、16 为 PQU 节点, 程序迭代 5 次收敛, 计算结果如表 7 所示。

表 7 IEEE 33 网络少量测计算结果

Tab. 7 Result of one poor- measure node power flow calculation for IEEE 33 distribution network

节点	电压幅值/pu	电压相角/(°)	节点	电压幅值/pu	电压相角/(°)
33	1.000 0	0.000 0	17	0.852 5	-0.889 4
1	0.995 0	0.024 6	18	0.994 2	0.007 2
2	0.971 4	0.164 4	19	0.988 4	-0.100 9
3	0.958 8	0.277 9	20	0.987 3	-0.132 2
4	0.946 2	0.394 6	21	0.986 3	-0.165 2
5	0.915 0	0.232 7	22	0.965 6	0.113 6
6	0.909 1	-0.171 3	23	0.954 7	-0.033 4
7	0.900 8	-0.106 2	24	0.949 2	-0.106 3
8	0.890 1	-0.234 7	25	0.911 7	0.301 8
9	0.880 2	-0.345 7	26	0.907 3	0.400 6
10	0.878 7	-0.332 4	27	0.887 8	0.545 4
11	0.876 2	-0.311 3	28	0.873 8	0.684 0
12	0.865 7	-0.475 6	29	0.867 7	0.874 1
13	0.861 8	-0.618 7	30	0.860 6	0.720 9
14	0.859 4	-0.687 4	31	0.859 0	0.678 8
15	0.857 1	-0.729 9	32	0.858 5	0.664 7
16	0.853 6	-0.871 7			

比较表 4 与表 5 的计算结果可知, 电压幅值没有偏差, 相角的最大偏差为 0.000 9°, 计算结果正确, 少点潮流计算方法成立。

5 结论

本文应用集抄系统采集的量测量冗余的特点,

研究了网络中某些节点不存在量测时的少量测潮流计算方法。经过分析,给出了少量测点网络可解性分析方法,并给出了实际的计算方法。算例验证了理论的正确性。该方法为配电网的少量测点的潮流计算提供了参考。

参考文献

- [1] 谢开贵,周家启. 树状网络潮流计算的新算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 116-120.
Xie Kaigui, Zhou Jiaqi. A new load flow algorithm for radial distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 116-120(in Chinese).
- [2] 张尧,王琴,宋文南,等. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 217-220.
Zhang Yao, Wang Qin, Song Wennan, et al. A load flow algorithm for radial distribution power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 217-220(in Chinese).
- [3] 车仁飞,李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 74-79.
Che Renfei, Li Renjun. A new three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 74-79(in Chinese).
- [4] Cheng C S, Shirmohammadi D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 671-679.
- [5] Zimmerman R D, Chiang H D. Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 2045-2051.
- [6] Shirmohammadi D, Hong H W. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 3(2): 753-762.
- [7] Chen T, Chen M. Distribution system power flow analysis-a rigid approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [8] IEEE Distribution Planning Working Group Report. Radial distribution test feeders[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 975-985.
- [9] 余娟,颜伟. 配电网合环网络模型及其馈线电流的计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 76-81.
Yu Juan, Yan Wei. The model of the closed loop distribution network and the current calculation of its feeders[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 76-81(in Chinese).

- [10] 刘健,董海鹏,程红丽. 采用等效负荷简化配电网[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 35-39.
Liu Jian, Dong Haipeng, Cheng Hongli. Simplified distribution analysis based on equivalent load model[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 35-39(in Chinese).
- [11] 吴政球,荆勇. 考虑负序零序非线性求解的三相潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 22(4): 77-81.
Wu Zhengqiu, Jing Yong. Three phase power flow solution based on node injection currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 22(4): 77-81(in Chinese).
- [12] 张小平,陈珩. 不对称三相潮流的对称分量分析法[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 1-11.
Zhang Xiaoping, Chen Hang. Symmetrical component analysis for unsymmetrical three phase power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 1-11(in Chinese).
- [13] 王守相,王成山. 基于区间算法的配电网三相潮流计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 52-58.
Wang Shouxiang, Wang Chengshan. Distribution three-phase power flow models based on interval algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 52-58(in Chinese).
- [14] 李慧,杨明皓. 配电网非量测负荷的最小二乘估计[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 47-51.
Li Hui, Yang Minghao. Least-square state estimation of pseudo-measured loads in distribution systems[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 47-51(in Chinese).
- [15] 李慧,杨明皓. 基于负荷电流的配电网非量测负荷估计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 33-37.
Li Hui, Yang Minghao. A load-current-based state estimation for distribution systems non-measurement loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 33-37(in Chinese).
- [16] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

收稿日期: 2007-03-06。

作者简介:

姜 彤(1970—),男,博士,教授,从事电力网络分析和计算机应用方面的研究;

彭 谦(1980—),男,博士研究生,研究方向为配电网自动化,
E-mail: pqncepu@163.com。

(实习编辑 王晔)

国家电网公司荣获“中华社会责任奖”

2007年12月16日,“中华民族品牌与企业社会责任高峰论坛暨2007年度企业社会责任调查活动揭晓颁奖典礼”在北京全国人大会议中心举行,国家电网公司以最高综合得分获得“中华社会责任奖”。本次评选活动旨在宣传为中国经济做出突出贡献的企业、民族品牌和公益人物,由中共中央党校学习时报社、中华企业社会责任研究会、中华民族品牌协会等单位主办,新华网、中华网、新浪网等近百个网络媒体进行了网上联展,备受社会各界关注。共有69家国内企业和49家外资在华企业参与了“中华社会责任奖”的网上投票评选,组委会根据投票、短信和实地调查情况进行了综合评分,国家电网、中国石油、中国移动、埃克森美孚、西门子、中国惠普、诺基亚、麦当劳等20家中外企业获奖,国家电网公司的综合得分位居首位。