

# 电网关键元件及其单调性研究 III: 应用

常康, 韩学山, 韩力, 王孟夏

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 探讨了关键元件及其单调性研究在电力系统中的主要应用。结合一定时间级别的负荷预测数据, 建立系统的运行模式, 提出了关键元件识别的方法。讨论了关键元件及其单调性在输电能力评估、网络安全预警以及网络结构评价方面的应用潜力。通过对电网络复杂性根本原因的分析, 指明了关键元件及其单调性研究能够简化电力系统分析的本质。通过山东电网 500kV 网络的算例验证了本文方法的正确性。

**关键词:** 电力系统; 运行模式; 关键元件; 单调性; 薄弱环节; 输电能力

## Study on the crucial element and its monotone in power grid part III: applications

CHANG Kang, HAN Xue-shan, HAN Li, WANG Meng-xia

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The applications in power systems of the proposed crucial element and its monotone are investigated. A method of crucial element identification is proposed based on a certain time-level load forecasting data and the given operation mode. The applications of crucial element and its monotone characteristic in the area of network transmission capability assessment, security early warning and network structure evaluation are discussed. The fundamental reason for the complexity of power grid is pointed out, and the essence of the simplification caused by the proposed idea is analyzed. The results of Shandong 500kV power grid test verify the proposed method.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50677036 and No.50377021).

**Key words:** power system; operation mode; crucial element; monotone; vulnerable part; transmission capability

中图分类号: TM711; TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0001-04

## 0 引言

电网复杂性以及市场竞争机制的引入, 必然使得电力系统运行与控制方面的诸多问题更加复杂和非直观。文献[1]和文献[2]分别就关键元件及其单调性的基本概念和内部机理进行了研究, 探索了一种分析复杂电网络载荷变化规律的直观方法。

本文首先结合一定时间级的负荷预测数据, 提出了识别关键元件的方法; 其次探索了关键元件及其单调性在网络输电能力评估、网络安全预警以及网络结构评价方面的应用; 然后, 指出了关键元件单调性能够简化系统分析的本质; 最后, 结合山东电网 500 kV 网架实际系统算例, 对本文所提关键元件识别方法和应用进行了验证。

## 1 关键元件识别

关键元件 (Crucial Element) 识别本质上是已

知潮流分布基础上的电力系统运行模式分析。结合一定时间级的负荷预测数据, 识别关键元件的步骤可以分为三步, 即划分运行模式时段、形成运行模式向量、潮流计算确定关键元件。具体的识别关键元件的流程图如图 1 所示。

### 1.1 划分运行模式时段

电力系统的运行是有一定模式可循的, 负荷的变化有其规律性。正因为如此, 按不同时间级的负荷预测, 有机组合、超前调度和在线调度, 以及实时的控制 (AGC 和 AVC)。由此也可见, 电力系统得以实时控制来自于这不同时间层次模式迭加的结果, 只是这些模式是由粗到细, 误差分布不同而已。发电模式紧跟负荷模式的变化而变化, 所以, 对运行模式划分就是对负荷曲线进行时段的划分。

本文是在小扰动条件下对电网中的关键元件单调性进行研究的, 因此, 可以对不同时间级的负荷预测进行分段线性化。以 1 小时的超前负荷预测为研究对象, 那么在每个 5 分钟的时间间隔内, 就可

以对负荷预测曲线进行近似线性化, 从而形成某一给定的运行模式。

实际上, 运行模式的划分时段可以不是等时间间隔的。负荷的变化有其规律性, 有时候变化快, 有时候变化慢。当负荷变化缓慢时, 可以适当扩大运行模式划分的间隔; 当负荷变化显著时, 可以适当缩小该间隔。针对具体的系统具体运行特点, 可以根据经验对运行时段进行划分。划分的根本依据是使得运行模式在每个时段内近似保持不变。这就保证了在划分的每一时段内关键元件单调性都能够成立。

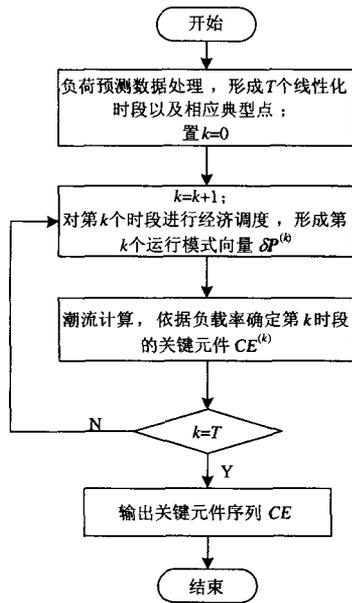


图 1 关键元件识别流程图

Fig. 1 Flow chart of the identification of crucial element

### 1.2 形成运行模式向量

对负荷预测曲线进行时段划分之后(假设划分出  $T$  个运行时段), 那么针对其中的任意一个时段  $k$ , 可以选取该时段的中点处的负荷数据为典型数据形成负荷模式向量  $\delta P_L$ 。那么, 必然存在某一发电方式  $\delta P_G$  与其中的负荷模式  $\delta P_L$  相适应(可以是经济调度或者 AGC 控制的结果)。这样就可以形成  $k$  时段的运行模式向量  $\delta P^{(k)}$ 。从而, 对于  $T$  个运行时段来说, 其运行模式序列可以用  $(n-1) \times T$  阶矩阵  $M$  表示, 即:

$$M = [\delta P^{(1)} \quad \delta P^{(2)} \quad \dots \quad \delta P^{(k)} \quad \dots \quad \delta P^{(T)}] \quad (1)$$

其中:  $\delta P^{(k)}$  表示第  $k$  时段内具有代表性的运行点处的  $(n-1)$  阶运行模式列向量,  $n$  为系统节点数。

### 1.3 潮流计算确定关键元件

针对任意一个运行模式向量  $\delta P^{(k)}$  均可以进行潮流

计算, 进而计算出输电元件的负载率, 以确定出该时段内输电网络中的关键元件  $CE^{(k)}$ 。类似的方法, 对  $T$  个时段分别进行。从而可以确定出所关注的区间内的关键元件序列  $CE$ , 可以记为:

$$CE = \{CE^{(1)}, CE^{(2)}, \dots, CE^{(k)}, \dots, CE^{(T)}\} \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 每个时段内的关键元件有可能不同。但是, 这并不意味着  $T$  个时段一定有  $T$  个不同的关键元件。在实际的电力系统中, 尤其是负荷变化比较平缓的系统中, 有时候运行模式由  $\delta P^{(k)}$  转移到  $\delta P^{(k+1)}$  并不足以改变关键元件。

## 2 关键元件及其单调性应用

电网关键元件单调性依托关键元件发挥作用, 该关键元件是监视电力系统运行是否安全的依据, 也是评价网络结构是否合理、挖掘(潜在)输电载荷能力的基础。一旦识别出关键元件, 便可针对其进行相应的监视、控制, 达到安全运行和提高电网载荷能力的目的。按这一思路, 不但能挖掘电网潜在的能力, 而且使得电网调度控制人员需处理的信息量最小化, 电网传输能力分析、评价直观化, 扩展、检修和改进电网决策简单化。

### 2.1 输电能力评估

依据 NERC 所定义的 ATC 概念, ATC 可记为:

$$ATC = TTC - ETC \quad (3)$$

其物理意义是描述现存交易 (ETC) 与总输电能力 (TTC) 之间的距离。

而本文所研究的关键元件的负载率  $lr_{CE}$  是以比例的形式描述的 ETC 与 TTC 之间的关系:

$$lr_{CE} = ETC / TTC \quad (4)$$

式 (4) 与式 (3) 的含义一致, 关键元件及其单调性的研究可以进行输电能力的评估。而且可以根据各元件的负载率差别进行均匀调度<sup>[3]</sup>, 以最大限度地发挥网络的能力。

### 2.2 网络安全预警

安全性监视是基于计算所得值的电力系统运行极限的在线校核。但是, 针对全网的所有输电元件进行安全监视是不能实现实时要求的。基于本文所提出的关键元件单调性的概念, 调度员在某一时段内只需要重点监视该时段的关键元件即可。

根据某一时间级的负荷预测曲线, 可以在线做出  $lr_{CE}$  随时间变化的曲线。可以通过设定一定的阈值(例如 80%) 来实现安全预警。当某种模式下出现负载率大于阈值时, 则提醒调度员进行再调度或者实时控制, 以保证留有足够的安全裕度。

同样的道理, 可以考虑 N-1 条件下的安全性监视。通过选取适当的事故集, 并逐一进行上述研究,

可以得到需要重点监视的输电元件序列。这里面涉及的只是组合复杂度的问题, 不再赘述。

### 2.3 网络结构评价

网络的不均匀性决定了关键元件的存在, 也给改善电网结构提供了空间。网络关键元件及其单调性研究实际上是对网络薄弱环节的辨识。一旦识别出关键元件, 便可以进行相应的改造或者安装补偿装置。

实际上在网络的设计阶段, 也可以根据未来负荷预测的典型数据进行关键元件及其单调性的分析。合理的选择线路参数, 以使得网络在典型条件下更接近于均匀电网<sup>[3]</sup>。

### 3 关键元件单调性使问题简化的本质

电网络存在复杂性的根本原因是 KVL 的存在。众所周知, 对于辐射型网络来说, 其设计、运行与控制都非常直观简单。但是, 对于存在 KVL 约束的有环网络来说, 其中的情形就复杂了。当出现诸如并行支路中的任一支路断开、交易顺序变更、发电模式变化、负荷扰动等等情况时, 网络载流的变化规律不易直观看出。

在给定的运行模式下, 关键元件及其单调性研究是基于 KCL 和 KVL 所决定的潮流方程, 搜索出当前模式下对网络安全和能力起决定作用的输电元件, 并且该关键元件的决定作用在当前运行模式下会继续保持。从而, 可以抛开 KVL 的约束, 用研究关键元件的载流变化代替研究整个系统的变化规律, 达到了简化系统分析的目的。

### 4 算例分析

以山东电网 500 kV 等效网络为例, 对本文提出的关键元件及其单调性进行验证和应用。其网络结

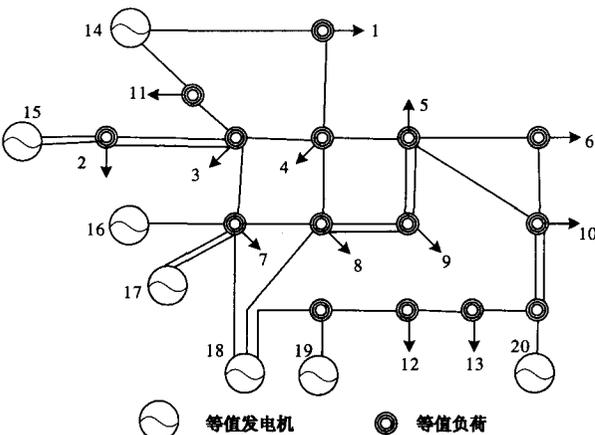


图 2 山东电网 500 kV 网架结构

Fig.2 Structure of Shandong 500kV power grid

构和输电元件参数分别如图 2 和表 1 所示。该系统共有 20 个节点, 31 条输电线路(包括 6 组双回线), 7 台等值发电机, 13 个等值负荷, 其中节点 18 为平衡节点。

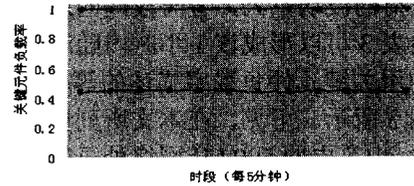


图 3 山东电网 500 kV 网络某 1 小时内的  $I_{rCE}$

Fig.3  $I_{rCE}$  of Shandong 500 kV power grid in an hour

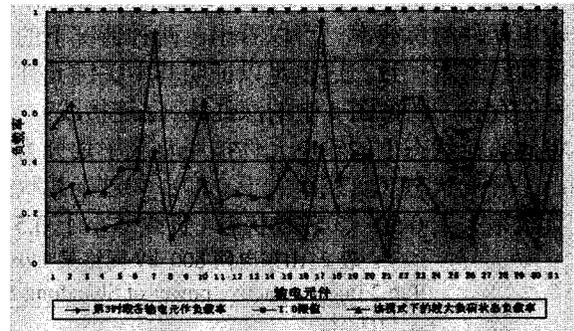


图 4 第 3 时段模式下的轻载和重载时各输电元件负载率

Fig.4 Load-rates of heavy and light load under the mode of the 3<sup>rd</sup> interval

表 1 山东电网 500 kV 支路数据 (标么值)

Tab.1 Branch data of Shandong 500kV system (in p.u.)

branch	r	X	b/2	limit
1-4	0.000 500	0.006 580	0.413 438	22.732 5
1-14	0.001 582	0.015 748	0.972 956	22.732 5
2-3(Dbl.)	0.000 604	0.008 384	0.474 075	22.732 5
2-15(Dbl.)	0.000 530	0.007 356	0.416 194	22.732 5
3-4	0.000 689	0.007 232	0.402 413	22.732 5
3-7	0.001 000	0.010 489	0.582 947	22.732 5
3-11	0.000 746	0.007 829	0.434 109	22.732 5
4-5	0.001 007	0.010 566	0.587 081	22.732 5
4-8	0.000 419	0.004 395	0.243 928	22.732 5
5-6	0.001 121	0.015 556	0.879 244	22.732 5
5-9(Dbl.)	0.000 762	0.007 992	0.443 756	22.732 5
5-10	0.000 788	0.010 927	0.620 156	22.732 5
6-10	0.000 571	0.007 926	0.447 891	22.732 5
7-8	0.000 750	0.010 403	0.588 459	22.732 5
7-16	0.001 021	0.014 159	0.800 691	22.732 5
7-17(Dbl.)	0.000 700	0.009 730	0.547 116	22.732 5
7-18	0.000 905	0.014 570	0.527 822	22.732 5
8-9(Dbl.)	0.000 524	0.005 494	0.304 566	22.732 5
8-18	0.001 810	0.022 608	1.055 644	22.732 5
10-20(Dbl.)	0.000 609	0.008 459	0.476 831	22.732 5
11-14	0.000 577	0.006 058	0.336 262	22.732 5
12-19	0.000 766	0.010 657	0.599 484	22.732 5
12-13	0.000 684	0.009 491	0.536 091	22.732 5
13-20	0.000 639	0.008 865	0.500 259	22.732 5
18-19	0.000 346	0.004 810	0.270 112	22.732 5

(注: 表 1 中 Dbl.表示双回线)

以文献[4]提出的多节点超短期负荷预测方法可以形成系统在一段时间内的负荷预测曲线以及运行模式序列。本文以山东电网 2006 年某日 1 小时的实际运行数据为依据, 以 5 分钟为间隔, 划分出 12 个有功运行模式, 如表 2 所示。表 3 是用本文方法

确定的关键元件及其负载率。

可见,在所研究的 1 小时区间内,关键元件 7-8 (泰山至淄川) 具有单调性,这是由于在所研究的范围内负荷的波动不大,各时段间的运行模式差异较小。由表 3 可以形成该 1 小时内随着负荷的波动而形成的用关键元件负载率描述的等效 ATC 的曲线,如图 3 所示。可见,在本文所列出的 1 小时研究区间内,山东电网 500 kV 网络处于较轻的负荷状态,所有输电元件均在半载以下,系统的 ATC 充裕。

如果以第 3 个 5 分钟时段为研究对象,那么在该模式下,图 4 描述了轻载和重载两种情况下的 31 个输电元件的负载率。可以看出,两种情况下的负载率曲线基本一致,这也足以证明其中关键元件单调性的存在。观察图 4 中的深红线(Δ连接线),可以将此负荷状态下的输电元件按照负载率划分为三类:①警戒状态(负载率大于 0.8);②过半载状态(负载率大于 0.5);③轻载状态(负载率小于 0.5)。

其实,针对这 12 个时段研究都可以发现,在系统进入重载状态时,总会有 4 个输电元件首先进入警戒状态。它们分别是输电元件 3-4(济南至淄博)、18-19(邹县电厂至枣庄)、19-12(枣庄至沂蒙)以及关键元件 7-8(泰山至淄川)。而其中,关键元件始终位于前列,也就是说,在所研究的 1 小时内调度员只要监视好输电元件 7-8,就可以确保其他元件处于安全载荷状态下。

上述研究结论是与山东电网的实际情况相吻合的。山东电网 500 kV 输电网络的电源集中在南部和西部,而负荷则集中在中北部和东部沿海地区。从而形成了西电东送和南电北送的格局。输电元件 3-4、7-8、18-19(19-12)正好形成了西电东送的割集断面,是整个网络中的关键环节。从上文可以看出,对关键断面的监视可以转化为更简单直观的关键元件的监视。

表 2 山东电网 500 kV 网络某 1 小时内每 5 分钟的节点有功注入量(标么值)

Tab.2 Injective active power of Shandong 500 kV power grid every 5 minutes in an hour (in p.u.)

时段 节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0.76	-0.82	-0.84	-0.75	-0.80	-0.74	-0.71	-0.72	-0.78	-0.76	-0.82	-0.88
2	-1.66	-1.54	-1.38	-1.29	-1.20	-1.15	-1.12	-1.14	-0.98	-1.13	-1.25	-1.26
3	-1.59	-1.53	-1.44	-1.54	-1.54	-1.39	-1.30	-1.30	-1.25	-1.37	-1.57	-1.54
4	-5.58	-5.56	-5.62	-5.48	-5.61	-5.40	-5.31	-5.29	-5.43	-5.37	-5.41	-5.44
5	-6.14	-6.55	-6.65	-6.66	-6.50	-6.49	-6.36	-6.35	-6.42	-6.41	-6.38	-6.28
6	-4.78	-4.95	-4.97	-4.87	-4.94	-4.78	-4.69	-4.83	-4.92	-4.75	-4.75	-4.79
7	-1.22	-0.98	-0.89	-0.86	-0.77	-0.73	-0.74	-0.83	-0.60	-0.75	-0.80	-0.93
8	-2.91	-2.81	-2.96	-2.78	-2.89	-2.84	-2.69	-2.67	-2.69	-2.70	-2.72	-2.75
9	-8.62	-8.85	-8.77	-8.94	-8.78	-8.83	-8.64	-8.79	-8.68	-8.80	-8.74	-8.55
10	-5.19	-5.61	-5.52	-5.57	-5.48	-5.42	-5.49	-5.46	-5.62	-5.41	-5.60	-5.63
11	-2.73	-2.78	-2.79	-2.67	-2.73	-2.68	-2.68	-2.64	-2.70	-2.73	-2.80	-2.80
12	-5.63	-5.66	-5.59	-5.59	-5.64	-5.61	-5.66	-5.61	-5.64	-5.63	-5.67	-5.59
13	-2.81	-2.86	-2.89	-2.92	-2.90	-2.88	-2.86	-2.88	-2.94	-2.90	-2.90	-2.91
14	12.76	14.14	13.93	13.43	13.43	12.72	12.15	12.69	12.91	12.69	13.50	13.59
15	6.77	6.63	6.61	6.53	6.53	6.44	6.47	6.33	6.24	6.33	6.37	6.11
16	3.96	3.84	3.78	3.85	3.86	3.87	3.81	3.78	3.77	3.82	3.77	3.80
17	9.41	9.28	9.23	9.20	9.10	9.07	9.05	9.02	9.01	9.09	9.03	9.09
18	15.03	15.01	15.07	15.09	15.07	15.03	14.95	14.87	14.87	14.92	14.99	14.95
19	-0.16	-0.15	-0.14	-0.12	-0.12	-0.12	-0.11	-0.11	-0.10	-0.11	-0.12	-0.12
20	2.51	2.45	2.55	2.62	2.61	2.62	2.59	2.60	2.65	2.63	2.56	2.60

表 3 山东电网 500 kV 网络某 1 小时内每 5 分钟的关键元件及其负载率

Tab.3 Crucial element and its load-rate of Shandong 500 kV power grid every 5 minutes in an hour

时段 指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CE	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8	7→8
lr <sub>CE</sub>	0.444	0.451	0.453	0.452	0.452	0.450	0.444	0.443	0.448	0.446	0.444	0.442

### 5 结论

结合超短期负荷预测,在小扰动的范围内,提出了确定关键元件的方法,探讨了关键元件及其单调性在电力系统中的应用潜力,指明了关键元件单调性研究简化问题分析的本质。山东电网 500 kV 网络的算例验证了本文理论的正确性,具体结论如下:

(1)关键元件识别实质上是系统运行模式的划分,一种运行模式必然与一个关键元件对应;但是,运行模式的变更不一定带来关键元件的变更。本文提出的结合一定时间级负荷预测曲线的关键元件识别方法可以准确地确定关键元件。

(下转第 9 页 continued on page 9)

## 参考文献

- [1] 江全元, 张鹏翔, 曹一家. 计及反馈信号时滞影响的广域 FACTS 阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 82-88.  
JIANG Quan-yuan, ZHANG Peng-xiang, CAO Yi-jia. Wide-area FACTS Damping Control in Consideration of Feedback Signals Time Delays[M]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 82-88.
- [2] 申铁龙.  $H_{\infty}$ 控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.  
SHEN Tie-long.  $H_{\infty}$  Control Theory and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [3] 高龙, Hill D J, 王幼毅, 等. 非线性系统的 DFL 及隐动态[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(9): 1-8.  
GAO Long, Hill D J, WANG You-yi, et al. Direct Feedback Linearization of Nonlinear Control systems and the Hidden Dynamics[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 1996, 36(9): 1-8.
- [4] 王德进.  $H_2$  和  $H_{\infty}$  优化控制理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.  
WANG De-jin.  $H_2$  and  $H_{\infty}$  Optimal Control Theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.
- [5] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M].

北京: 清华大学出版社, 2002.

- YU Li. Robust Control—Linear Matrix Inequality Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [6] 蔡超豪. 非线性  $H_{\infty}$  励磁控制器的设计[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 50-52.  
CAI Chao-hao. Design of Non-linear  $H_{\infty}$  Excitation Controller[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 50-52.
- [7] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.  
LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen, LI Xu-wu, et al. Genetic Algorithm Toolbox—for Use with Matlab[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005.
- [8] 石颖, 王成山. 时间延迟对电力系统稳定器性能的影响[J]. 继电器, 2006, 34(13): 21-24.  
SHI Jie, WANG Cheng-shan. Time Delay Impact on the Performance of the Power System Stabilizer[J]. Relay, 2006, 34(13): 21-24.

收稿日期: 2008-06-05; 修回日期: 2008-06-12

作者简介:

蔡超豪(1965-), 男, 教授, 从事电力系统供用电及其控制的教学与研究. E-mail: lorermr@yahoo.com.cn

(上接第 4 页 continued from page 4)

(2) 本文提出的关键元件单调性研究能够正确地进行网络能力评价和安全监视, 其功能与传统的关键输电断面监视一致, 并且该方法更加简单直观。

至此, 该系列研究在给定的运行模式下, 就关键元件及其单调性的概念与基础、机理与证明以及实际应用等进行了有益的探索。可以肯定的是, 运行模式规律是存在的。表现在负荷有其自身的变化规律, 发电计划根据一定的负荷变化规律也有对应的调度规律, 结合超短期负荷预测和发电调度规律, 建立一定延续时间的运行模式是没有问题的。当然其它诸如输电能力计算、静态电压稳定评估、以及输电元件载荷定值等, 本身就是在给定模式下进行的。可见, 本研究有较宽泛的应用领域和对象。

## 参考文献

- [1] 常康, 韩学山, 王孟夏, 等. 电网关键元件及其单调性研究 I: 概念与基础[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 1-5.  
CHANG Kang, HAN Xue-shan, WANG Meng-xia, et al. Study on the Crucial Element and Its Monotone in Power Grid Part I: Concepts and Foundation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 1-5.
- [2] 常康, 韩学山, 王孟夏, 等. 电网关键元件及其单调性研究 II: 机理与证明[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 1-6.

CHANG Kang, HAN Xue-shan, WANG Meng-xia, et al. Study on the Crucial Element and Its Monotone in Power Grid Part II: Mechanism and Certification[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 1-6.

- [3] 张强, 韩学山, 等. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 84-89.  
ZHANG Qiang, HAN Xue-shan, et al. Analysis of Security Economic Dispatch and Homogeneous Dispatch[J]. The Proc of CSU-EPSA, 2005, 17(2): 84-89.
- [4] 韩力, 韩学山, 等. 多节点超短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 30-34.  
HAN Li, HAN Xue-shan, et al. Method for Ultra-short Term Multi-node Load Forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 30-34.

收稿日期: 2008-05-12; 修回日期: 2008-06-14

作者简介:

常康(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: ckang718@163.com

韩学山(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

韩力(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化。