

电网关键元件及其单调性研究 I: 概念与基础

常康, 韩学山, 王孟夏, 韩力

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 在一定条件下, 发电、负荷有可追寻的变化趋势, 这样复杂电网运行必然存在明确的物理规律, 在运行中实时寻求这一规律及其变化趋势的快速方法, 对电网调度、控制、监视等功能实现具有重要意义。在前人研究的基础上, 结合不均匀性和单调性的概念, 提出了电网关键元件具有单调性的思想。以有功的传输为研究对象, 定义了运行模式、输电通路、关键元件及其单调性等概念。建立了输电元件有功流与网络输送有功总流之间的函数关系, 讨论了灵敏度在关键元件单调性研究中的应用。以简化直流潮流为例阐明关键元件单调性的存在性。最后结合 5 节点系统算例对本文思想进行了验证。论文分为三个研究系列: 一是概念和基础部分; 二是机理与证明部分; 三是应用部分。

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 I: concepts and foundation

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

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

Abstract: The trend of power generation and load is clear under certain conditions. So there is explicit physical law in the operation of complex power grid. It is of great importance for the dispatch, control and supervision of power systems to find the law in real-time. Based on the previous studies, the idea of a crucial element having monotone is proposed as the combination of monotone and non-homogeneous. Taking the transmission of active power as a research object, the concepts of operation mode, transmission path, crucial element and its monotone are defined. The relationship between active power flow in transmission element and total active power flow transferred in power grid is founded, and then crucial element's monotone is discussed with sensitivity theory. The existence of monotone is analyzed qualitatively considering the DC model. Finally, taking the 5-bus system as an example, the results verify the proposed idea. This Part I forms the basic idea of crucial element and its monotone. The following Part II will analyze the mechanism of the proposed idea in depth. And then the Part III will discuss the applications of the proposed idea in power systems.

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)06-0001-05

0 引言

电网规模日益庞大, 加之大型机组、特高压的发展, 使电力系统安全、可靠、经济的运行、调度与控制变得越来越复杂; 另外, 电力工业正在进行解除管制的改革, 竞争机制的引入, 又加剧了这一复杂性。因此, 这一复杂性必将导致: ①面对系统运行或决策者需要处理的信息量剧增, 他们必须进行充分的筛选和分析; ②市场机制将导致可预见性变差, 为满足发电、输电、配电及用电的实时平衡, 在一定安全、可靠指标下, 对系统应对突发性事件提出了更高的要求; ③电网复杂、非直观的规律,

以及市场机制驱使输电元件流量趋向于极限边缘, 使电网运行中的薄弱环节难以发现, 当一个事件发生时, 容易造成预想不到的连锁反应。综上所述, 有必要对电网中复杂、非直观的规律进行挖掘和解析, 寻求对电网复杂性问题简捷直观的分析方法, 这对于电力系统安全、可靠、经济的运行调度与控制具有重要的理论意义。

电网的复杂性, 以及电力市场竞争机制的引入, 给电力系统运行分析增加了难度。国内外学者通过各种手段, 试图提供一种电力系统分析的简便直观的方法。这些方法主要集中在输电能力分析中的瓶颈元件^[1-4]、电网可视化监控中的关键元件^[5,6]以及电网脆弱性分析中的薄弱环节^[7-9]等。其实, 这些研究透射出电力系统蕴含的一个简单规律, 即某

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677036, 50377021)

一元件的特性对系统的整体特性起着关键的决定作用。非线性电路理论^[10-14]在电力系统的应用,为进一步论证电网中的关键元件的单调变化特性奠定了基础。

实际上,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)^[15]。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。所以在一定程度上,发电、网络及负荷的平衡是有规律可把握的。而且,电网运行中各输电元件的载荷及其对系统的影响程度是不同的^[16,17]。本研究就是在上述背景和对应规律下,以有功功率传输为研究对象,对电网关键元件及其单调变化规律进行研究,从基础和概念、机理与证明以及应用三部分进行论述。

本文首先在前人研究的基础上,指出了进行关键元件单调性研究的两个思想来源;然后提出了相关概念;进而结合灵敏度的概念对关键元件的单调性进行了定性的分析;最后利用算例对本文思想进行了验证。

1 思想来源

1.1 电网不均匀性

各种文献中关于瓶颈元件、关键元件和薄弱环节研究充分体现了电网不均匀性的存在。

基于潮流方程的输电能力计算方法^[1-4]拥有一个共性:在一定的源受点模式下,不断增加网络输送的功率,直到某一约束条件受到限制为止。这一约束条件往往是某一输电元件的能力受限,而此时其他输电元件的能力却没有得到充分发挥。可见,在一定的运行模式下,输电瓶颈元件对网络能力起着决定作用。

现代能量管理系统(SCADA/EMS)信息巨大,如果不加筛选,那么调度员就会被淹没在海量数字之中。近年来,国内外学者对电力系统运行状态信息可视化进行了很多探索^[5,6]。其实质是对最小信息的挖掘,目的就是希望能够使调度员更直观地把握电力系统的运行状态。显然,对每个输电元件进行监控在实际的电力系统中是不可行的。实际上,大部分的电力系统故障最初都是从某一个或者几个输电元件开始的。也就是说某些元件对电力系统的安全起着关键作用,而某些元件则未必。可见,在众多的状态数据中,仅把关键元件的状态实时、直观地显示出来,可以更有效地实现监控的功能。

系统的脆弱性是通过薄弱环节体现出来的^[7-9]。电网中的薄弱环节可以表现为输电断面、输电元件或者节点的形式。电网中的薄弱环节研究,为电力系统的安全运行、控制与监视提供了一种新的思路,即电力系统的整体特性是由某一元件的特性所决定的。

上述不管是输电能力分析中的瓶颈元件、安全监控中的关键元件,还是脆弱性分析中的薄弱环节,都表明电网载流的不均匀性,说明局部元件对整个系统的决定作用。这就是本文提出关键元件及其单调性思想的原由之一。

1.2 网络响应单调性

在一定条件下,电力系统可以用非线性电阻电路来表示。从而,出现了一种基于非线性电阻电路特性的关于电力系统潮流的研究^[10-14]。对于非线性系统来说,当在基态工作点附近发生大范围扰动时,传统的基于工作点附近线性化的灵敏度分析方法就失去了意义。然而,应用函数的单调性很容易计算大范围变化的灵敏度(Large Change Sensitivity)^[11]。文献[11, 12]论证了非线性电阻网络中支路量与节点量之间具有单调映射关系时应具备的条件。文献[13, 14]借助非线性电阻电路中单调性的概念,提出了一种计算ATC的简单算法。

拥有单调性函数具有很多优良的属性,诸如依据单调性的概念,就可以依据定义域端点的函数值来界定定义域内所有点的函数值的上下限。从一般意义上说,依据单调性,可以利用某点的局部特征来描述某一区间内的整体特征,这本身就是主宰特性的体现。

可见,把“单调性”的概念应用到电力网络分析中,可以简化某些问题的分析。这就是本文提出关键元件及其单调性思想的原由之二。

2 基本概念

为使本文阐述清晰起见,首先给出如下相关本文思想所需的几个基本定义。

2.1 运行模式

所谓电力系统运行模式,是指某时刻发电、负荷及网络结构的总体构成。电力系统运行模式的研究,是研究电力系统运行规律性和重现性的重要组成部分。在网络结构确定的条件下,明确电力系统在某一时间段内发电、负荷的变化规律,是研究电力系统潮流变化规律的基础。

设向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 表示系统各节点发电、负荷注入的比例系数,系数大于0意味着发电,系数小于0意味着负荷,系数等于0意味着联络。该向量可以称为

运行模式向量。在该运行模式下, 节点有功注入量可写为式 (1) 的形式:

$$P = \lambda \times \delta P \quad (1)$$

其中: λ 为标量, 表示在该运行模式下, 发电和负荷之间传输有功流的大小。

2.2 输电通路

一定运行模式下, 电网输送有功功率所经历的路径称为输电通路。

在输电通路中, 输电元件 jk 上的有功流 (记为 p_{jk} , 以实际流动方向为参考方向) 与该元件的有功限值 (记为 p_{jk}^{\max}) 之比定义为该输电元件的负载率 (记为 lr_{jk}), 即

$$lr_{jk} = p_{jk} / p_{jk}^{\max} \quad (2)$$

可见, 输电元件负载率最小值为 0, 最大值为 1。

2.3 关键元件及其单调性

输电通路中负载率最大的输电元件集称为关键元件集, 该关键元件集中的任一元件都是输电通路中的关键元件。

在一定运行模式下, 随发电、负荷的增加, 若关键元件不变, 则称该关键元件具有单调性。

3 灵敏度分析

3.1 输电元件有功流与 λ 间的函数关系

建立任一输电元件 jk 上输送的有功流 p_{jk} 与网络输送有功功率 λ 之间的函数关系, 是分析网络关键元件单调性的基础。

在电力系统的实际运行中, 对应负荷曲线上的某一点, 相应的发电方式也就随之确定。这样, 系统的运行模式向量 δP , 以及网络上需要输送的有功功率 λ 也就随之确定。进而, 在网络结构一定的前提下, 网络中任一输电元件 jk 的有功载流量 p_{jk} 也就随之确定。从而, 在不考虑网络结构变化的情况下, p_{jk} 可以写为 δP 和 λ 的非线性函数, 即:

$$p_{jk} = f(\lambda, \delta P) \quad (3)$$

在一定的运行模式下, δP 保持不变, 式 (3) 可以写为:

$$p_{jk} = f(\lambda) \quad (4)$$

将式 (4) 在基态点处进行泰勒级数展开, 得:

$$p_{jk} = p_{jk}^0 + \frac{d p_{jk}}{d \lambda} \Delta \lambda + o(\Delta \lambda) \quad (5)$$

其中: $o(\Delta \lambda)$ 表示高阶小量, 当在研究的时段内负荷的波动较小时, 此高阶小量可以忽略, 从而式 (5) 可以写为:

$$p_{jk} = p_{jk}^0 + \left. \frac{d p_{jk}}{d \lambda} \right|_{\lambda_0} \Delta \lambda \quad (6)$$

可见, 当网络输送功率增加 $\Delta \lambda$ 时, 式 (6) 中的输电元件流量对 λ 的微分值 (后文简称微分值) 对该输电元件流量变化有直接关系。该微分值大于 0 意味着元件流量增加, 该微分值小于 0 意味着元件流量减少, 该微分值等于 0 意味着在此模式下该元件的流量不受各节点注入功率变化的影响。(论文第 II 部分对在给定运行模式下, 各输电元件的载流量随着 λ 的增加而增加将给出数学证明。)

若该微分值在任何情况下都不变化, 则输电元件流量的规律就很容易掌握。在分析含有非线性系统的电力系统模型时, 该微分值仍然是 λ 的函数, 可以记为:

$$\frac{d p_{jk}}{d \lambda} = g(\lambda) \quad (7)$$

从而, 在输电元件有功流随着 λ 的增加而增加的过程中, 会出现三种增长模式, 即: ① $d^2 p_{jk} / d \lambda^2 > 0$ 、② $d^2 p_{jk} / d \lambda^2 < 0$ 、③ $d^2 p_{jk} / d \lambda^2 = 0$ 。第三种情况在比较理想的直流潮流模型中得到满足, 从而简化直流潮流的分析变得直观简单。而在其他两种情况下, 使得电力系统的分析变得复杂而不是直观的。

3.2 直流潮流模型下的关键元件单调性

直流潮流的支路模型可以描述为:

$$p_{jk} = (\theta_j - \theta_k) / x_{jk} \quad (8)$$

其中, p_{jk} 为支路 jk 输送的有功功率, θ_j 、 θ_k 分别为节点 j 、节点 k 的电压相角, x_{jk} 为支路 jk 的电抗值。

节点方程为:

$$P = B \theta \quad (9)$$

其中: P 为节点有功注入列向量, θ 为节点电压相位列向量, B 为节点电纳矩阵, 其元素分别为:

$$b_{jk} = -1/x_{jk}, \quad b_{jj} = \sum_{k \in j} 1/x_{jk}$$

进一步地, 如果记节点电抗阵 $X = B^{-1}$, 则式 (9) 可以写为:

$$\theta = X P \quad (10)$$

从而可以获得支路潮流与节点注入之间的关系为:

$$p_{jk} = \frac{1}{x_{jk}} a^{(j,k)} X P \quad (11)$$

其中: $a^{(j,k)}$ 为对应节点 j 、 k 的支路-节点关联行向量, 该向量仅第 j 个元素为 1, 第 k 个元素为 -1, 其余元素均为 0。

在一定的运行模式下, 结合式 (1) 得:

$$p_{jk} = \frac{1}{x_{jk}} a^{(j,k)} X(\lambda \times \delta P) \quad (12)$$

很显然，支路有功流 p_{jk} 关于网络传输有功 λ 的导数是常数，即：

$$\frac{dp_{jk}}{d\lambda} = \frac{1}{x_{jk}} a^{(j,k)} X \delta P \quad (13)$$

可以看出，在线性系统中，各输电元件负载率之间保持既定的关系不变。从而，保证了关键元件单调性的成立。实际上，电力系统在正常运行的范围内，其功角一般能够保持在线性度比较好的 30° 以内。也就是说，直流潮流能够定性地说系统的运行趋势问题。下面结合算例予以定性的说明。

4 算例分析

图 1 所示 5 节点系统，表 1、表 2 分别是该系统支路和基态时相关数据，基态下的负荷如图 1 所示，所有数据为标么值。

发电节点为 4 和 5，负荷节点为 1、2 和 3，输电通路包含所有元件。基态时，网络中发电节点向负荷节点输送的有功功率值 λ_0 为：

$$\lambda_0 = 1.6 + 2 + 3.7 = 7.3$$

系统当前的运行模式向量 δP 为：

$$\delta P = \frac{1}{7.3} \times [-1.6 \quad -2 \quad -3.7 \quad 5]^T$$

保持基态时的运行模式不变，使 λ 从 λ_0 开始递增，直到瓶颈元件制约其进一步增长。而且这个过程中保持负荷功率因数不变，节点电压保持为额定水平。经过潮流计算，可得各输电元件负载率的变化情况，如表 3 所示。

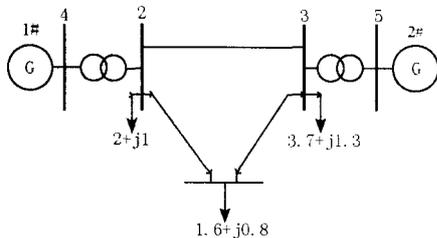


图 1 5 节点系统结构图 (标么值)

Fig.1 Topology of 5-bus system (in p.u.)

表 1 5 节点系统支路数据 (标么值)

Tab.1 Branch data of 5-bus system(in p.u.)

branch	r	x	b/2	limit
1-2	0.040	0.250	0.250	3.0
1-3	0.100	0.350	0.000	3.0
2-3	0.080	0.300	0.250	1.5
2-4	0.000	0.015	0.000	6.5
3-5	0.000	0.030	0.000	6.5

表 2 发电机节点数据 (标么值)

Tab.2 Generation data of 5-bus system(in p.u.)

bus	generation value
4	5.000
5	slack

表 3 反复潮流计算结果 (标么值)

Tab.3 Results of RPF (in p.u.)

λ	lr_{2-1}	lr_{3-1}	lr_{2-3}	lr_{4-2}	lr_{5-3}
7.30	0.559	0.012	0.882	0.769	0.393
7.60	0.582	0.014	0.918	0.801	0.411
7.90	0.606	0.013	0.954	0.832	0.429
8.20	0.629	0.017	0.988	0.863	0.448
8.30	0.637	0.018	1.000	0.873	0.454

由表 3 可见，在此运行模式变化范围内，发电节点向负荷节点输送的最大有功功率 λ_{max} 为 8.3。在 $[\lambda_0, \lambda_{max}]$ 区间内输电元件 2-3 的负载率始终是最大的，也就是说，在给定的运行模式下关键元件 2-3 且具有单调性。

对应表 3，可逐一计算输电通路中各元件的微分值，结果如表 4 所示。

由表 4 可知，各支路的微分数值变化范围并不是显著的，其中关键元件 2-3 的微分值始终维持在 0.169 附近。这也从一个侧面说明了，该运行模式下系统的线性度比较好，与直流潮流模型下的特性相似。由此，再次表明此系统中关键元件单调性的存在。

表 4 各支路的微分值的变化 (标么值)

Tab.4 Differentials of every element (in p.u.)

λ	微分 2-1	微分 3-1	微分 2-3	微分 4-2	微分 5-3
7.30	0.238	0.025	0.169	0.664	0.404
7.60	0.240	0.027	0.169	0.664	0.407
7.90	0.242	0.028	0.169	0.664	0.410
8.20	0.244	0.029	0.169	0.664	0.413
8.30	0.244	0.029	0.169	0.664	0.414

另外，计算分析发现，当关键元件 2-3 的负载率达到 1.0 时，其它输电元件仍然有很大的裕度可以利用。可见，在该运行模式下关键元件 2-3 制约了其它元件输电能力的发挥。若想进一步提高网络的利用程度，必须从改变运行模式或 FACTS 配置入手，才能寻求网络利用最大化的运行模式。论文的第 III 部分将给出关键元件及其单调性分析在电力系统中的应用。

5 结论

结合电网载流不均性和网络响应单调性的特点，提出了关键元件具有单调性的思想。以有功功率传输为研究对象，定义了运行模式、输电通路、关键元件及其单调性等概念。经过灵敏度分析以及算例验证，说明了本文思想的正确性。关键元件及其单调性研究在电力系统网络评价、能力评估、安全监视等方面可以得到广泛的应用。

参考文献

- [1] 韩学山, 李晓波. 考虑元件长期载容许条件的最大可用输电能力的实用计算方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (24): 10-15.
HAN Xue-shan, LI Xiao-bo. Practical Calculation of Maximal Available Transfer Capability Considering Long-term Load Permissible Condition of Power Transmission Components[J]. Power System Technology, 2004, 28 (24): 10-15.
- [2] Hamoud G. Assessment of Available Transfer Capability of Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (1): 27-32.
- [3] Yan Ou, Singh C. Assessment of Available Transfer Capability and Margins[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17 (2): 463-468.
- [4] 刘皓明, 严正, 倪以信, 等. 快速计算电网可用输电能力的交流灵敏度方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (19): 11-15.
LIU Hao-ming, YAN Zheng, NI Yi-xin, et al. An AC Power Flow Based Sensitivity Method for the Fast Calculation of Available Transfer Capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (19): 11-15.
- [5] 杨光. 电网可视化技术[J]. 国际电力, 2004, 8(2): 45-47.
YANG Guang. Visualization of Electric Power Systems[J]. International Electric Power for China, 2004, 8(2): 45-47.
- [6] Overbye T J, Weber J D. Visualizing the Electric Grid[J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(2): 52-58.
- [7] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12): 32-38.
ZHOU De-cai, ZHANG Bao-hui, YAO Feng, et al. Fast Search for Transmission Section Based on Graph Theory[J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26 (12): 32-38.
- [8] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (12): 1-5.
CAO Yi-jia, CHEN Xiao-gang, SUN Ke. Identification of Vulnerable Lines in Power Grid Based on Complex Network Theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (12): 1-5.
- [9] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (8): 7-10.
DING Ming, HAN Ping-ping. Small-world Topological Model Based Vulnerability Assessment Algorithm for Large-scale Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (8): 7-10.
- [10] Ilic M D, et al. The No-gain Theorem and Localized Response for the Decoupled P- θ Power Network with Active Power Losses Included[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1985, 32 (2): 170-177.
- [11] Hasler M, Wang C. Monotonic Dependence on Sources in Nonlinear Resistive Circuits[J]. AEU, International Journal of Electronics and Communications, 1992, 46(4): 242-249.
- [12] Chauffoureaux P, Hasler M. Monotonicity in Nonlinear Resistive Circuits[A]. In: Proc of the 1990 Internat Symp on Circuits and Systems[C]. 1990.395-398.
- [13] Ilic M D, Yoon Y T, Zobian A. Available Transmission Capacity (ATC) and Its Value Under Open Access[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 636-645.
- [14] Hasler Martin, WANG Chang-lu, Ilic Marija, et al. Computation of Static Stability Margins in Power Systems Using Monotonicity[A]. In: Proc. ISCAS'93. Chicago: 1993.2196-2199.
- [15] Wood A J, Wollenberg B F. Power Generation, Operation and Control[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [16] Khairuddin A B, et al. A Novel Method for ATC Computations in a Large-Scale Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (2): 1150-1158.
- [17] 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.

收稿日期: 2008-05-12

收稿日期: 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;

王孟夏(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。