

电网关键元件及其单调性研究 II: 机理与证明

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: 对关键元件单调性进行了机理分析和相关论证。结合运行圆和极限圆概念, 对输电元件有功限值进行了修正。在此基础上, 分三种情况由浅入深地对电力系统中的关键元件单调性进行了研究: (1) 在直流潮流基础上, 考虑正弦函数的非线性, 建立了数学模型, 对输电元件输送有功功率与节点注入之间的函数单调关系以及关键元件单调性的存在性进行了严格的数学证明, 并给出了估计单调区间的算法; (2) 再考虑进电阻参数, 即损耗的影响, 论证了有损情况下, 输电元件有功流依然是节点注入的单调函数, 而且关键元件单调性依然成立, 但是单调区间与无损耗时相比会根据 r/x 的大小发生偏移; (3) 定性的讨论了电压水平和无功功率对有功功率关键元件单调性的影响。最后结合 5 节点系统算例对上述三种情况进行了比较验证。

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 II: mechanism and certification

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

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

Abstract: The mechanism and the related certification of crucial element and its monotone proposed in Part I is analyzed. Based on the concepts of operating circle and limiting circle, the limiting value of active power flow in transmission elements is amended. Under a given operation mode, the crucial element's monotone of power systems is studied from the simple to the more complex in three situations as following. Firstly, on the basis of DC power flow model, taking the sine nonlinearity into consideration, the monotone relationship between active power flow in transmission elements and injective active power, and the existence of crucial element's monotone are proven mathematically. And then, an algorithm is proposed to find the monotone interval in which the crucial element's monotone maintains. Secondly, taking resistance, namely power losses, into consideration, the monotone relationship between active power flow in transmission elements and injective active power, and the existence of crucial element's monotone continue to maintain. Comparing with the no-loss situation, the monotone interval shifts according to the value of r/x when the loss is considered. Thirdly, the impact of voltage level and reactive power on the crucial element's monotone is discussed qualitatively. A comparison test with 5-bus system is following, in which the certification about the above three situations is done.

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

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)07-0001-06

0 引言

电网复杂性以及电力市场竞争机制的引入, 使得电力系统分析决策的直观性变得越来越差。寻求对电网复杂性问题简洁直观的分析方法, 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。在文献[1]基础上, 本文进一步探讨电网关键元件单调性的机理和相关的数学论证。

直流潮流模型下电网关键元件单调性自然存

在^[1], 而实际上, 以功率形式描述的电力系统模型, 是一个有功功率和无功功率互相耦合、带有损耗和三角函数非线性的复杂系统^[2], 由此这种自然存在性是否保持值得探讨。幸运的是, 实际的电力系统中无功功率均尽量采取就地补偿的原则, 无功功率的大量传输是不可能的。从而, 网络中传输的有功流是网络载流的主部, 这也是符合实际的。另一方面, 有功功率与电压相角耦合更为紧密, 从而实现有功无功之间的解耦, 重点研究有功和相角 ($P-\theta$) 间的关系是可能的。文献[3~7]等利用 $P-\theta$ 关系分别在电力系统安全评估、输电能力计算以及网络输电

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

特性等方面进行了有效的研究。

本文首先建立了输电元件模型,对输电元件的有功限值进行了修正;然后,在 $P-\theta$ 模型基础上,分别研究了三角函数非线性、损耗以及电压无功对关键元件单调性的影响;最后,结合 5 节点系统算例对本文结论进行了比较验证。

1 输电元件模型

输电元件(包括变压器、输电线路)模型以图 1 所示 π 型等值电路表示。图中, $p_{jk}+jq_{jk}$ 、 $p_{kj}+jq_{kj}$ 分别为节点 j 、 k 两侧功率, $g_{jk}-jb_{jk}$ 为支路 jk 的导纳, jc_{j0} 和 jc_{k0} 为支路两侧对地等效电纳(一般情况下 $jc_{j0}=jc_{k0}$), 变压器支路以 j 侧为标准, 其非标准变比隐含于上述参数之中。

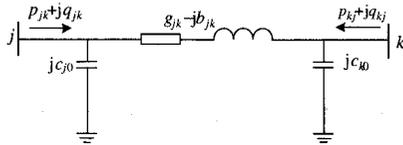


图 1 支路 π 型等值电路

Fig.1 The π -type equivalence circuit

由节点 j 流向节点 k 的有功和无功功率分别为:

$$p_{jk} = u_j^2 g_{jk} - u_j u_k (g_{jk} \cos \theta_{jk} - b_{jk} \sin \theta_{jk}) \quad (1)$$

$$q_{jk} = u_j^2 (b_{jk} - c_{j0}) - u_j u_k (g_{jk} \sin \theta_{jk} + b_{jk} \cos \theta_{jk}) \quad (2)$$

其中: u_j 、 θ_j 和 u_k 、 θ_k 分别是节点 j 、 k 的电压幅值、相位, $\theta_{jk} = \theta_j - \theta_k$ 。

整理式 (1)、(2) 得:

$$(p_{jk} - u_j^2 g_{jk})^2 + (q_{jk} - u_j^2 (b_{jk} - c_{j0}))^2 = (u_j u_k y_{jk})^2 \quad (3)$$

其中: $y_{jk} = \sqrt{g_{jk}^2 + b_{jk}^2}$ 是支路导纳幅值。

式 (3) 称为输电元件的运行圆, 同时考虑到输电元件长期热载荷能力, 存在一极限圆, 如下:

$$p_{jk}^2 + q_{jk}^2 = (s_{jk}^{\max})^2 \quad (4)$$

其中: s_{jk}^{\max} 是输电元件热载荷 MVA 容量。

同理, 由节点 k 流向节点 j 的复功率同样存在运行圆和极限圆的表达。

联立式运行圆与极限圆, 并考虑功率增长方向, 可以得出运行条件下的输电元件有功限值 p_{jk}^{\max} 。可以看出, 该有功限值 p_{jk}^{\max} 随着支路两端电压幅值的变化而变化。对于一个无功充足的全 PV 节点系统, 该限值是一个常数(通常忽略无功, 认为有功限值等于复功率限值); 而对于一个无功受限的全 PV 系统或者含 PQ 节点系统来说, 该限值是运行模式的

函数。由以上分析可见, 只要已知元件两端的电压幅值, 就可以确定元件的有功输送能力, 该能力大小仅取决于输电元件的物理参数。当两端电压不同时, 元件有功能力应取小者。

在上述基础上, 本文分别研究正弦函数非线性、损耗以及电压无功对关键元件的影响。其中, 在研究无功影响时, 只研究系统在发生小扰动, 各节点电压维持在规定水平附近的场景下, 系统中输电元件有功传输的关键元件单调性。

2 无损全 PV 系统中的关键元件单调性

本节在假设系统为全 PV 节点, 且忽略输电元件模型中的电阻和对地电纳的基础上, 详细研究考虑有功传输非线性条件下的单调性。

2.1 无损非线性系统数学模型

在上述假设下, 输电元件潮流模型可表示为:

$$P_{jk} = u_j u_k b_{jk} \sin \theta_{jk} \quad (5)$$

其中: θ_{jk} 为输电元件由节点 j 到节点 k 电压的相角差; b_{jk} 为输电元件由节点 j 到节点 k 的电纳; p_{jk} 为从 j 节点流向 k 节点的有功流; u_j 、 u_k 为节点电压幅值, 在此假设条件下为常数, 不妨设为 1, 此时各输电元件的有功限值为常数。

由此, 任意节点 j (非平衡节点, 下同) 的有功潮流方程为:

$$P_j = \sum_{k \in j} b_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) \quad (6)$$

对应给定的向量 δP , 发电、负荷的运行模式可以描述为:

$$P = \lambda \times \delta P \quad (7)$$

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; P 为节点注入有功功率组成的列向量。

由式 (6) 和式 (7), 可以将在一定模式下无损非线性有功潮流方程抽象表达为:

$$f(\theta, \lambda) = 0 \quad (8)$$

值得注意的是, 任意输电元件必须满足:

$$-\theta_{jk}^{\max} \leq \theta_{jk} \leq \theta_{jk}^{\max} \quad (9)$$

$$-p_{jk}^{\max} \leq p_{jk} \leq p_{jk}^{\max} \quad (10)$$

其中: θ_{jk}^{\max} 是输电元件考虑静稳储备对应的最大相角差; p_{jk}^{\max} 是输电元件考虑热载荷限制的有功限值。

式 (9) 和式 (10), 对应给定运行模式变化必

然存在一个最大区间, 可表征为 $[0, \lambda_{\max}]$, λ_{\max} 为给定模式变化的最大标量。

对应给定模式, 在某一初始状态下, 当标量发生 $\Delta\lambda$ 微小扰动时, 任意输电元件的有功潮流会发生如下微小的近似变化:

$$\Delta p_{jk} = b_{jk} \cos \theta_{jk}^0 \Delta \theta_{jk} \quad (11)$$

若认为 $b_{jk} \cos \theta_{jk}^0$ 是小扰动状态下输电元件的等效导纳, 则依据式(11), 任意节点 j 有功潮流的微小变化可表示为:

$$\Delta P_j = \sum_{k \in j} b_{jk} \cos \theta_{jk}^0 (\Delta \theta_j - \Delta \theta_k) \quad (12)$$

式(12)的矩阵形式:

$$\Delta P = B \Delta \theta \quad (13)$$

其中: B 是由所有输电元件等效导纳构成的节点导纳矩阵, 该矩阵与直流潮流节点导纳阵具有同样的结构和意义, 其区别就是该矩阵是变参数的。

式(13)逆的形式为:

$$\Delta \theta = Z \Delta P \quad (14)$$

其中: $Z = B^{-1}$, 具有节点阻抗阵的意义。

结合式(7), 针对给定运行模式下有功功率的微小变化 $\Delta P = \Delta \lambda \times \delta P$, 式(14)变成:

$$\Delta \theta = Z[\Delta \lambda \times \delta P] \quad (15)$$

2.2 输电元件有功流的单调性

在给定的运行模式下, 研究每个输电元件的有功流与标量 λ 之间的变化关系, 是研究网络整体特性的基础。下文基于函数单调性的概念, 证明了在给定运行模式下, 任一输电元件有功流 p_{jk} 是标量 λ 的单调递增函数。

引理 1: 对函数 $f(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 内连续, 在开区间 (a, b) 内可导, 若在开区间 (a, b) 内任意一点导数都不为 0 (即 $f'(x) \neq 0$), 则函数 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 内具有单调性。

证明: 反证法。

假设连续可导的函数 $f(x)$ 不具有单调性。那么在区间 (a, b) 内必然存在某一邻域 $(c-\delta, c+\delta)$, 在点 c 的左右两侧的导数符号不一致。那么, 在 c 点的函数值 $f(c)$ 取得局部极值。从而有:

$$f'(x)_{x=c} = 0$$

这与任意一点的导数值不为 0 矛盾。

所以, 原命题成立。证毕。

引理 2: 由式(8)和式(15)所描述的有功潮流方程, 在 Z 为满秩矩阵、 $\delta P \neq 0$ 的情况下, 输电元件有功流 p_{jk} 对标量 λ 的导数不为 0。

证明: 依据复合函数导数的定义, 得:

$$\frac{dp_{jk}}{d\lambda} = \frac{dp_{jk}}{d\theta_{jk}} \times \frac{d\theta_{jk}}{d\lambda} \quad (16)$$

依据式(5)得:

$$\frac{dp_{jk}}{d\theta_{jk}} = b_{jk} \cos \theta_{jk} \quad (17)$$

另外,

$$\Delta \theta_{jk} = a^{(j,k)} \Delta \theta \quad (18)$$

其中: 向量 $a^{(j,k)}$ 是支路-节点关联矩阵中与支路 jk 相对应的行向量。

再结合式(15), 得:

$$\frac{d\theta_{jk}}{d\lambda} = \lim_{\Delta \lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta_{jk}}{\Delta \lambda} = a^{(j,k)} Z \delta P \quad (19)$$

从而, 导数 $dp_{jk}/d\lambda$ 可以表示为:

$$\frac{dp_{jk}}{d\lambda} = b_{jk} \cos \theta_{jk} \times a^{(j,k)} Z \delta P \quad (20)$$

可见, 在定义域的开区间 $(-\theta_{jk}^{\max}, \theta_{jk}^{\max})$ 和 $(-p_{jk}^{\max}, p_{jk}^{\max})$ 内, 只要保证 Z 为满秩矩阵、 $\delta P \neq 0$, 那么导数 $dp_{jk}/d\lambda$ 就不为 0。

从而命题成立。证毕。

不难看出, 引理 2 蕴含着一定的物理含义。如果一个电网是连通的(Z 满秩), 而且网络中存在转送的功率($\delta P \neq 0$), 那么, 当转送功率发生 $\Delta\lambda$ 的微小扰动后, 每一输电元件的有功流量都会随之发生变化, 不会存在保持有功流不变的输电元件, 这是电路定律(KCL、KVL)决定的。

定理 1: 在给定的运行模式下, 在 Z 为满秩矩阵、 $\delta P \neq 0$ 的情况下, 输电元件有功流是标量 λ 的单调递增函数。

证明: 结合引理 1 和引理 2, 不难推出输电元件有功流是标量 λ 的单调函数。

若已知两点的潮流模式情况: 一是运行模式的标量为 λ_1 , 二是运行模式的标量为 λ_2 , 且 $\lambda_2 > \lambda_1$, 即运行模式是单调递增的。

在此情况下, 任意输电元件 jk 的有功流必然存在两种情况, 即依据 Lagrange 中值定理, 必然存在一点 $\xi \in (\lambda_1, \lambda_2)$, 使得下两式之一成立:

$$p'_{jk}(\xi) = \frac{p_{jk}(\lambda_2) - p_{jk}(\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} > 0 \quad (21)$$

$$p'_{jk}(\xi) = \frac{p_{jk}(\lambda_2) - p_{jk}(\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} < 0 \quad (22)$$

式(21)表示的是输电元件 jk 的有功流与参考方向一致,式(22)表示的是输电元件 jk 的有功流与参考方向相反。两者都表明一定运行模式单调变化时,输电元件 jk 有功流的绝对值都是增大的。

由式(20)可以看出,只有当 $\cos\theta_{jk}=0$ 时,输电元件 jk 有功流的增长才停止,而此时的 $\theta_{jk}=\pm\pi/2$,这与实际又不符。

从而命题成立,证毕。

2.3 关键元件的单调性

在一定的运行模式下,如果在标量 λ 变化的某一区间内,关键元件能够保持单调性,那么该区间就称为该模式下的单调区间。下面证明单调区间的存在性。

引理 3: 含标量 λ 的有功潮流方程 $f(\theta, \lambda)=0$ 的解向量 $\theta(\lambda)$ 是标量 λ 的连续函数,那么必然存在一个关于标量为 λ_0 值的邻域 $(\lambda_0-\Delta\lambda, \lambda_0+\Delta\lambda)$,在该邻域内,解向量 θ 内各元素大小顺序不变。

证明:反证法。

假设不存在这样的邻域。那么某一状态下,即 $\lambda=\lambda_0$ 时,解向量 θ^0 内各元素满足如下关系式:

$$\theta_1^0 \geq \theta_2^0 \geq \dots \geq \theta_n^0 \quad (23)$$

注意,上述下标顺序是表示大小的而不表示节点编号。在此基础上,当标量发生 $\Delta\lambda$ 的微小变化后,解向量变为:

$$\theta' = \theta^0 + \Delta\theta \quad (24)$$

而当 $\Delta\lambda \rightarrow 0$ 时,如果新的解向量 θ' 内各元素不再满足式(23),则必有 $\Delta\theta \neq 0$ 。显然,这与解向量 $\theta(\lambda)$ 是标量 λ 的连续函数相矛盾。

因此,原命题成立。证毕。

定理 2: 由式(8)和式(15)所描述的有功潮流方程中,在某一基态下,存在使关键元件保持单调性的单调区间。

证明:首先根据式(8)可以建立关于输电元件负载率和标量间关系的方程:

$$f(\mathbf{r}, \lambda) = 0 \quad (25)$$

在研究 I 中提到输电元件 jk 的负载率 lr_{jk} 表示为:

$$lr_{jk} = \frac{p_{jk}}{p_{jk}^{\max}}$$

由定理 1 知输电元件有功流 p_{jk} 是标量 λ 的单调函数,从而式(25)的解向量 \mathbf{r} (输电元件负载率)是标量 λ 的连续函数。由引理 3 可以证明,必然在

基态标量 λ_0 附近存在一个邻域 $(\lambda_0-\Delta\lambda, \lambda_0+\Delta\lambda)$,使得新的负载率大小顺序与 λ_0 时的顺序一致,即保持关键元件的单调性。

从而命题得证。证毕。

至于该单调区间的大小,本文给出一种按照充分性进行保守估计的方法。在某一标量初值 λ_0 下,可以按照如下思路对标量增量 $\Delta\lambda$ 的上界进行估计:假设每个输电元件按照标量初值 λ_0 时的增长速率增加负载率,那么当其达到关键元件标量初值 λ_0 时的负载率的时候,关键元件仍然保持不变。具体说明如下:

假设标量初值 λ_0 时输电元件 1 为关键元件,即 lr_1 最大。那么其它任一输电元件 m 的负载率 lr_m 按照标量初值 λ_0 时的增长率增加到 lr_1 时,所需的标量增量为:

$$\Delta\lambda_m = \frac{lr_1 - lr_m}{\frac{dp_m}{d\lambda} \cdot \frac{1}{p_m^{\max}}} \quad (26)$$

那么该充分性区间的上界 $\Delta\bar{\lambda}$ 可以表示为:

$$\Delta\bar{\lambda} = \min\{\Delta\lambda_m \mid 2 \leq m \leq L\} \quad (27)$$

其中, L 表示网络中的输电元件数。

下面给出该充分性的证明。

证明:欲证明充分性,即证明在 $\Delta\lambda$ 满足式(27)范围内,关键元件依然满足单调性,只需证明输电元件 m 中的导数值 $dp_m/d\lambda$ 是关于标量 λ 的单调递减函数。

$$\frac{d^2 p_{jk}}{d\lambda^2} = \frac{d(\frac{dp_{jk}}{d\lambda})}{d\theta_{jk}} \times \frac{d\theta_{jk}}{d\lambda} \quad (28)$$

结合式(19)和式(20)得:

$$\frac{d^2 p_{jk}}{d\lambda^2} = -b_{jk} \sin\theta_{jk} \times (a^{(j,k)} \mathbf{Z} \mathbf{D} \mathbf{P})^2 \quad (29)$$

其中: j, k 表示输电元件 m 两端的节点号。在非空载状态下,式(29)所示的二阶导数小于零。

所以,充分性满足。证毕。

至此,我们可以更全面的描述在某一运行模式下输电元件载流量 p_{jk} 与标量 λ 的函数关系,即该函数在定义域内是一个单调递增的凸函数。

3 损耗对关键元件单调性的影响

在上述基础上,进一步考虑电阻的影响,依然假设全网电压水平平坦(Flat Voltage Level,不妨设各点电压为 1.0),讨论损耗对关键元件单调性的影响。

3.1 损耗对有功传输特性的影响

考虑电阻时, 输电元件有功流由式(5)变为式(1), 进一步可以写为:

$$P_{jk} = u_j u_k y_{jk} \sin(\theta_{jk} - \alpha_{jk}) + u_j^2 g_{jk} \quad (30)$$

其中: α_{jk} 为输电元件 jk 的阻抗角, y_{jk} 输电元件 jk 的导纳幅值。

类似于定理 1 的证明, 同样可以证明考虑损耗的情况下, 输电元件的有功流依然是标量 λ 的单调递增函数。此时, 输电元件有功流对标量 λ 的二阶导数为:

$$\frac{d^2 P_{jk}}{d\lambda^2} = -u_j u_k y_{jk} \sin(\theta_{jk} - \alpha_{jk}) \times \left(\frac{d\theta_{jk}}{d\lambda}\right)^2 \quad (31)$$

可见, 当 $\theta_{jk} = \alpha_{jk}$ 时出现拐点, 即函数的凹凸性与运行状态有关。这样虽然式(27)中关于单调区间的充分性估计方法在这种情况下就不适用了, 但是定理 2 中关于单调区间的存在性的证明依然成立。

3.2 有损与无损情况下关键元件单调性比较

式(30)通过移项和换元可以简写成式(32)的形式:

$$P_{jk} = u_j u_k y_{jk} \sin \theta'_{jk} \quad (32)$$

其中: $P_{jk} = P_{jk} - u_j^2 g_{jk}$, $\theta'_{jk} = \theta_{jk} - \alpha_{jk}$ 。在系统结构参数确定、运行电压保持在既定水平的条件下, $u_j^2 g_{jk}$ 和 α_{jk} 均为常数。

对比式(32)和无损条件下模型式(5)可以发现, 两者具有相同的表达式。也就是说, 考虑损耗不会使网络性质发生本质变化, 而只是使网络的状态根据 r/x 的大小发生一定量的偏移, 可以看作是解空间的平移。在实际的电力系统中, r/x 的值往往比较小, 在一定的范围内无损情况下的关键元件单调性不会发生改变。

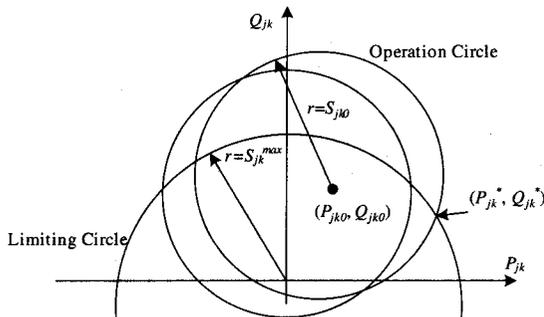


图 2 有损与无损时的运行圆和极限圆对比
Fig.2 Comparison of operating circle and limiting circle between with and without losses

图 2 是有损与无损时的运行圆和极限圆的对比。可以看出电阻参数使得运行圆的圆心、半径发生微小的变化, 相应的有功限值和运行状态也会跟着变化。而这种微小变化在一定范围内并不会影响关键元件的单调性, 在第 5 节中结合算例将对此进行说明。

4 电压无功对关键元件单调性的影响

4.1 电压水平对有功传输的影响

从第 1 节中关于输电元件模型的分析中可以看出, 电压水平的提高可以有效的提高有功限值; 从静稳曲线上也可以看出, 电压水平的提高可以提高最大传输能力。

由式(5)可知, 在保证 FVL 的前提下, 电压水平的高低影响的是每个输电元件的负载率, 但是对于元件之间的相对关系不会产生本质的影响。即在一定的运行模式下, 电压水平不会改变关键元件的单调性, 而只是根据输送能力的不同, 改变单调区间大小。

4.2 无功功率对关键元件的影响

无功功率的传输使得节点电压发生变化(认为 $\partial V/\partial P \approx 0$, $\partial V/\partial Q \neq 0$), 节点电压的变化改变了有功传输限值。仍然以有功传输为研究对象, 那么这就进一步影响了输电元件的负载率, 有可能使关键元件发生改变。

无功的影响比较复杂, 可以分三种情况讨论。

(1) 无功充足支撑, 电压水平得到进一步提高时, 关键元件单调性得到加强, 单调区间扩大; (2) 无功支撑不足, FVL 条件不能满足, 但是节点电压还处于安全范围以内时, 无功功率大量流动, 降低了可用的有功输送能力, 单调区间迅速缩小; (3) 无功支撑匮乏, 出现电压崩溃现象时, 将导致关键元件单调性的消失。可见, 充足的无功功率支撑, 是使系统具有关键元件单调性的保障。

幸运的是, 电力系统的无功功率大部分采取就地补偿的方式, 避免了无功功率的大量传输。这就使得电力系统正常运行时, 节点电压能够始终维持在额定值附近。也就是说, 在小扰动的范围内, 关键元件单调性一般是可以保持的。

其实, 在定理 2 的证明过程中, 仅仅要求满足解向量是标量 λ 的连续函数即可。可见, 不管是直流潮流、保留三角函数非线性的无损有功潮流, 还是保留三角函数非线性的有损有功潮流, 关键元件单调性都会自然满足, 而区别就是单调区间的大小问题了。直流潮流的单调区间是整个可行域 $[0, \lambda_{\max}]$; 保留三角函数非线性的无损有功潮流的单调

区间是基态运行点附近的某一邻域 $[\lambda_0-\Delta\lambda, \lambda_0+\Delta\lambda]$ ；保留三角函数非线性的有损有功潮流的单调区间也是基态运行点附近的某一邻域 $[\lambda_0-\Delta\lambda', \lambda_0+\Delta\lambda']$ ，只是邻域的上下边界与无损情况相比有所偏移。无功充足而提高电压水平可以扩大单调邻域；无功不足导致电压水平恶化会减小单调邻域，直至电压崩溃而破坏了连续性使得关键元件单调性消失。

5 算例分析

仍然以研究 I 中所用到的 5 节点系统为例，依次对三种情况进行对比分析。

Case 1: 忽略输电元件的对地导纳，各节点电压维持在 1.0 水平上，测试电阻参数的影响。此时，

表 1 无损和有损时负载率结果比较 (标么值)

Tab.1 Results of load-rate comparison between with and without losses (in p.u.)

λ	lr_{2-1}		lr_{3-1}		lr_{2-3}		lr_{4-2}		lr_{5-3}	
	无损	有损								
7.30	0.541	0.559	0.008	0.012	0.918	0.882	0.769	0.769	0.354	0.393
7.50	0.556	0.574	0.008	0.014	0.943	0.904	0.790	0.790	0.364	0.405
7.70	0.571	0.589	0.008	0.015	0.968	0.925	0.811	0.810	0.373	0.418
7.95	0.589	0.608	0.009	0.018	1.000	0.952	0.838	0.835	0.385	0.433

表 2 不同电压水平下的负载率、关键元件及其区间上限 (标么值)

Tab.2 Load-rate, key element and its maximal interval under different voltage levels (in p.u.)

U_i	lr_{2-1}	lr_{3-1}	lr_{2-3}	lr_{4-2}	lr_{5-3}	关键元件	$\Delta\lambda$
0.95	0.541	0.008	0.918	0.769	0.354	2-3	0.401
1.00	0.541	0.008	0.918	0.769	0.354	2-3	0.447
1.05	0.541	0.008	0.918	0.769	0.354	2-3	0.482
1.10	0.541	0.008	0.918	0.769	0.354	2-3	0.525

表 2 是不同电压水平下各输电元件基态时的负载率和关键元件及其单调区间上限。由表 2 可以看出，电压水平不会改变关键元件。而且，随着电压水平的提高，单调区间在不断增大。也就是说，电压水平越高，关键元件单调性更易于保持。

Case 3: 在完整的交流潮流下，考虑电压无功的影响。此时，必须根据第 1 节中的理论对有功限值进行修正。

由于无功支撑不足，在功率传输的过程中，节点电压随之下降(如表 3 所示)。表 4 是基态和极限运行状态时修正后的有功限值。

经验证明，上述情形下关键元件依然是输电元件 2-3，而且在 $\Delta\lambda=0.353$ 的范围内保持单调性。可见，只要无功的传输没有引起电压幅值大的扰动，那么关键元件的单调性依然能够保持。

6 结论

本文对一定模式下的电网关键元件单调性进行了机理分析，具体结论如下：

(1) 在无功支撑充分、忽略损耗，考虑三角函数非线性的模型中，在一定的运行模式下，任一输电元件有功载流量 p_{jk} 是关于网络传输功率标量 λ 的

网络中的无功流动非常小，有功限值可以近似认为等于复功率限值。表 1 是此背景下忽略损耗和考虑损耗两种情况下，不同负荷水平下的输电元件负载率比较。

由表 1 可以看出，输电元件 2-3 是关键元件并具有单调性。经过无损和有损情况的比较，可以看出电阻参数影响的只是每个元件负载率的大小，但是对于各元件负载率之间的关系并无本质影响。正如式 (32) 所示，模型的解的结构与无损时相比并没有发生变化。

Case 2: 忽略输电元件对地电纳和电阻参数，假设各点无功充分，测试电压水平对关键元件的影响。

单调递增的凸函数，关键元件单调性在一定区间内成立。

(2) 损耗不改变输电元件载流量 p_{jk} 关于标量 λ 的函数的单调性，但是使得该函数的凹凸性随着运行状态而变化；损耗不会改变网络的关键元件单调性，只是单调区间与无损时相比会根据 r/x 的大小发生一定量的偏移。

表 3 基态和极限运行状态时的节点电压 (标么值)

Tab.3 Bus voltage under base and maximal mode (in p.u.)

节点号	基态电压	最大模式电压
1	0.862	0.833
2	1.078	1.075
3	1.036	1.031
4	1.050	1.050
5	1.050	1.050

表 4 基态和极限运行状态时的有功限值 (标么值)

Tab.4 Active power flow limit under base and maximal mode (in p.u.)

支路号	基态时时有功限值	最大模式时时有功限值
1-2	2.441	2.403
1-3	1.793	1.752
2-3	1.391	1.388
2-4	6.389	6.408
3-5	6.444	6.431

(下转第 66 页 continued on page 66)

用。但这部分的实现难点是如何将 IEC61850 模型库中的信息进行分类,例如如何知道哪些信息是动作元件,哪些信息是运行告警等等,虽然缺乏统一的提取原则,但还是有一些原则可用,所以我们可以配置工具上作些预处理,让配置工具对信息进行较粗的分类,然后再人工挑选,这样处理的结果不错。

4 结束语

在符合 IEC61850 通讯体系的变电站自动化系统中,规约转换是一个繁杂的工作,尤其是在保护装置和录波器等智能设备大都采用非 IEC61850 协议的今天。CORBA 技术为应用于 IEC61850 变电站自动化系统中的规约转换装置的研发提供了新的思路和解决方案,基于 CORBA 技术的软件平台和基于分布式结构的硬件平台的应用使得规约转换装置十分灵活方便,在平滑升级、互操作性、以及兼容性上带来的好处是不错的,但是 CORBA 技术也有其局限性,例如: CORBA 的复杂性、CORBA 没有和开发工具紧密耦合、CORBA 的 IIOP 是精密的通讯协议不容错、CORBA 的重构苦恼等等都给 CORBA 的应用带来一些问题,目前在规约转换装置中只应用了 CORBA 的最基本的技术,并且仅仅

限于装置内部,这样做的主要原因是为了使网络环境更干净,使 CORBA 的应用更简单。目前国内一些 IEC61850 的变电站自动化系统已经投入运行,但是数量有限并且都是规模比较小的变电站。随着 IEC61850 变电站自动化系统在数量和规模上的扩大,规约转换装置的研发还会遇到一些问题需要进一步研究解决。

参考文献

[1] IEC. IEC 61850: Communication Networks and Systems in Substations [M/CD]. Geneva: IEC, 2003.
 [2] 孙其博,杨放春,邹华,基于 CORBA 技术的分布式网[J].数据通信,2001,(4).

收稿日期:2008-05-14; 修回日期:2008-06-13

作者简介:

王文龙(1973-),男,高级工程师,主要研究方向为变电站自动化系统、IEC61850 及其支撑协议;E-mail:wangwl@nari-relays.com

徐广辉(1976-),男,工程师,主要研究方向为变电站自动化系统、继电保护及故障信息系统;

朱中华(1979-),男,工程师,主要研究方向为变电站自动化系统、IEC61850 及其支撑协议。

(上接第 6 页 continued from page 6)

(3) 电压水平不会改变关键元件单调性,单调区间随着电压水平的提高而增大;当无功匮乏出现电压崩溃时关键元件单调性消失,而在实际系统的正常运行过程中,关键元件单调性是能够得以维持的。

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] 张伯明,陈寿孙,严正.高等电力网络分析(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2007.
 [3] Kaye R J, Wu F F. Analysis of Linearized Decoupled Power Flow Approximations for Steady-state Security Assessment[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1984, 31(7): 623-636.
 [4] Hasler M, Wang C, Ilic M, et al. Computation of Static Stability Margins in Power Systems Using Monotonicity[A]. In: Proc ISCAS'93[C].Chicago:

1993.2196-2199.

[5] 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.
 [6] Ilic M. Network Theoretic Conditions for Existence and Uniqueness of State Solutions to Electric Power Circuits[A]. In: Proc. ISCAS'92[C].San Diego: 1992.2821-2828.
 [7] Ilic M, Spong M W, Fischl R. The No-gain Theorem and Localized Response for the Decoupled $P-\theta$ Power Network with Active Power Losses Included[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1985, CAS-32(2): 170-176.

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;

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。