

联于弱交流系统的 HVDC 输电系统 输电能力和电压稳定性的研究

邱革非, 束洪春, 董俊, 刘志坚, 唐岚
(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 利用一种常用的简化 HVDC 输电系统模型, 基于基频的系统变量分析了直流系统功率传送到极限的条件. 换流器整流侧定电流控制方式下直流功率传送极限和电压稳定性之间的关系已经有明确结论. 区分换流器定电流和定功率控制方式, 采用经典电压稳定分析判据讨论该模型下换流节点电压稳定性, 分析了在两种控制方式下直流功率传送极限和换流节点电压稳定性之间的关系, 并结合实例得出了明确的结果.

关键词: HVDC; 短路比; 电压稳定; 功率传送极限; 输电系统

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2005)03 - 0050 - 06

Analysis of Power Transmission Capability and Voltage Stability of HVDC System Connected to Weak AC System

Q U Ge-fei, SHU Hong-chun, DONG Jun, L U Zhi-rjian, TANG Lan

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: This paper analyzes the condition in which HVDC system reaches the limit of power transmission with fundamental frequency quantities. Since the relationship between this condition and voltage stability of converter under constant current control mode has been identified, this relationship in both constant current and constant power control modes is elaborated through example.

Key words: HVDC; short circuit ratio; voltage stability; power transmission limit; transmission system

0 引言

当前电力供应持续紧张, 新的输电通道的建设由于经济和环保的原因越来越困难. 因此, 各电网在努力拓展新网架的同时, 也尽力挖掘现存电网的输电能力, 电网的电压安全裕度被大大压缩, 导致电压失稳超过功角失稳而成为电网故障的主要现象, 引起学术界的关注. HVDC 输电具有适合于大功率、远距离传送电能、可靠性高的特点, 在电力系统中正在得到越来越多的应用, 尤其是在近年迅猛发展的中国电网中. 在西电东送工程中, 输电距离超过 1 000 km, 容量达 1 亿 kW, 采用 HVDC 输电必然是一个理想的选择. 但大量采用直流输电技术, 又带来了关于电压稳定的一些新问题. 在稳定问题的研究领域, 功角稳定问题的研究已经较为成熟, 在 HVDC 输电技术的研究方面, 国内外学者作了大量工作, 也获得了很多成果. 但相对于对功角稳定和传统交流输电技术的研究而言, 对电压稳定和 HVDC 输电技术的研究还有待进一步深入, 特别是对实际问题的分析研究. 本文将利用一个单馈入直流输电模型对直流输电极限和换流节点的电压稳定性问题进行研究, 虽然目前 HVDC 输电技术远较该模型复杂, 比如实际中大量采用的是交直流并行输电和直流多落点输电技术, 但该文得出的结论和分析方法可以在未来的研究中继续推广.

收稿日期: 2005 - 05 - 10 **基金项目:** 国家自然科学基金项目 (项目编号: 50347026, 50467002); 云南省科技攻关项目 (项目编号: 2003GG10); 云南省应用基础研究项目 (项目编号: 20020025M, 2004E0020M).

第一作者简介: 邱革非 (1969 ~), 男, 硕士, 讲师. 主要研究方向: 电力系统电压稳定. E-mail: tsvgefei@126.com

1 弱交流系统

弱交流系统是指在有直流馈入的节点上,交流系统的阻抗相对于直流功率比较高,从而系统表现出较低的惯性.系统越弱,交直流间的相互影响越强^[1].交流系统的强弱可以通过将联于交流系统的 HVDC 换流器的直流功率容量和交流系统的强度进行比较获知.一种简单的方法就是将表征系统强度的系统短路容量除以直流换流器的容量,这就是 IEEE 推荐的 SCR (Short Circuit Ratio),即短路比指标.

$$SCR = \frac{S}{P_{dN}} \tag{1}$$

S 为额定电压时,交流系统在换流站交流母线三相对称短路时的短路容量,以 MVA 为单位. P_{dN} 是直流系统额定功率.可见, SCR 实际上就是以直流额定功率为功率基值,以换流站母线电压为电压基值的交流系统导纳标么值 Y_{ac} .为了同时考虑交流系统等效阻抗和换流站交流滤波器及无功补偿电容器的作用,还引入了有效短路比 ESCR (Effective Short Circuit Ratio) 的概念:

$$ESCR = \frac{S_{ac} - Q_{ac}}{P_{dN}} \tag{2}$$

其中, Q_{ac} 为当换流站交流母线电压取额定值 U_N 时,由交流滤波器和无功补偿电容器所产生的无功功率.

SCR 值越小,系统越弱.按照 SCR 值的大小,可以将 AC/DC 系统分为三类:

- 1) SCR 值大于 3 的高 SCR 系统;
- 2) SCR 值在 2 和 3 之间的低 SCR 系统;
- 3) SCR 值低于 2 的极低 SCR 系统.

一般要求系统运行于高 SCR 状态,但设计时也必须考虑在紧急情况下,系统在低 SCR 和极低 SCR 状态下运行的情况.

2 分析模型

为了研究直流系统的功率输送极限,本文采用文献 [2] 提出的简化 HVDC 换流器模型 (如图 1 所示).其中 P_d 是从整流器通过直流线路传送到逆变器端的直流功率, U_{dc} 是直流电压, P_{dc} 、 Q_{dc} 是传送到换流母线的有功功率和无功功率, U 是换流母线的节点电压, δ 是换流母线功角, P_{ac} 、 Q_{ac} 是从逆变器传送到电网的有功功率和无功功率. Z 是交流电网戴维南等效阻抗, θ 是等效阻抗的阻抗角, B_c 是交流滤波器和无功补偿器的导纳.

在这个模型中,假设交流网络可以用戴维南等效电路表征,即电压源 E 和阻抗 Z 这个模型只考虑包括同步补偿机在内的电压控制装置没有动作前的准稳态情况,在计算电源阻抗时,如果有补偿机则其阻抗采用暂态电抗 x_d .显然该模型对从换流母线端看出的交流电网作了极大的简化,因此只能够适用于围绕运行点的小干扰情况和准稳态情况的分析,而不适用于对交流电网端作详细分析.

将换流母线电压 U , 功角 δ 和直流电流 I_{dc} 等三个变量定义为状态变量, P_d , 换流息弧角 α , 变压器分接头 t , B_c , E 等作为控制变量^[2], 则包含在换流节点功率平衡方程中的交直流功率都是状态变量和控制变量的函数.这些函数可以表示为:

$$\begin{cases} g_1(\bar{x}, \bar{u}) = P_{dc} - P_d \\ g_2(\bar{x}, \bar{u}) = P_{dc} - P_{ac} \\ g_3(\bar{x}, \bar{u}) = Q_c - Q_{dc} - Q_{ac} \end{cases} \tag{3}$$

式中, \bar{x} , \bar{u} 分别是状态变量向量和控制变量向量.上式又可以用向量形式表示为:

$$\bar{g}(\bar{x}, \bar{u}) = (g_1, g_2, g_3)^T \tag{4}$$

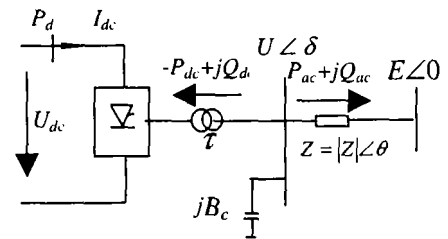


图1 联于弱交流系统的HVDC换流站简化模型
Fig.1 A simplified model of a HVDC converter connected to an AC network

在平衡点,函数满足:

$$\bar{g}(\bar{x}, \bar{u}) = 0 \quad (5)$$

设 \bar{x}_0, \bar{u}_0 是一个平衡点,在平衡点附近的小扰动应该仍然满足方程(5),即

$$\bar{g}(\bar{x}_0 + \bar{x}, \bar{u}_0 + \bar{u}) = 0 \quad (6)$$

在平衡点附近将方程(6)线性化可得:

$$\frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{x}} \bar{x} + \frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{u}} \bar{u} = 0 \quad (7)$$

式中, $\frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{x}}$ 和 $\frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{u}}$ 分别是方程相对于状态变量 \bar{x} 和控制变量 \bar{u} 的 Jacobi 矩阵,以下分别用 G_x 和 G_u 表示. 另外 $[G]_{ij}$ 用来表示矩阵 G 的第 i 行第 j 列.

3 HVDC 输送极限的分析

文献[1]中建议,假设 I_{dc} 立即响应整流器触发角 α 的变化,最大功率曲线 MPC 可以通过如下方法求取:从一个平衡点出发(该点通常是额定运行点,DC 功率,DC 电流,AC 电压和逆变器电压标么均为 1),保持电源电压,换流变压器分接头位置,交流滤波器和无功补偿器的导纳不变,逆变器熄弧角 β 保持在最小值,改变直流电流,作出电流功率曲线.按照这个方法,控制变量中,除直流功率增量 P_d 外,所有控制变量增量均为零.如此,方程(7)可改写为:

$$G_x \bar{x} + G_u \bar{u} = 0 \quad (8)$$

$$\bar{x} = [U, \alpha, I_{dc}]^T, \quad \bar{u} = [P_d]$$

$$G_x = \begin{bmatrix} -\frac{\partial P_{dc}}{\partial U} & 0 & -\frac{\partial P_{dc}}{\partial I_{dc}} \\ \frac{\partial(P_{dc} - P_{ac})}{\partial U} & -\frac{\partial P_{ac}}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_{dc}}{\partial I_{dc}} \\ \frac{\partial(Q_c - Q_{dc} - Q_{ac})}{\partial U} & -\frac{\partial Q_{ac}}{\partial \alpha} & -\frac{\partial Q_{dc}}{\partial I_{dc}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$G_u [1, 0, 0]^T \quad (10)$$

$$P_{ac} = \frac{1}{|Z|} [U^2 \cos \alpha - EU \cos(\alpha + \beta)] \quad (11)$$

$$Q_{ac} = \frac{1}{|Z|} [U^2 \sin \alpha - EU \sin(\alpha + \beta)] \quad (12)$$

$$P_{dc} = CU^2 [\cos 2\alpha - \cos(2\alpha + 2\mu)] \quad (13)$$

$$Q_{dc} = CU^2 [2\mu + \sin 2\alpha - \sin(2\alpha + 2\mu)] \quad (14)$$

$$I_{dc} = KU [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (15)$$

式中, μ 为换流重叠角.

$$C = \frac{3}{4} \frac{S_T}{P_{dN}} \frac{1}{u_k \%} \frac{1}{2} \quad (16)$$

S_T 和 $u_k \%$ 分别为换流变压器容量和短路比.

直流系统的输送功率极限就是 MPC 曲线的最大值,在这一点上, $P_d / I_{dc} = 0$ 由式(8)可得:

$$\bar{x} = -G_x^{-1} G_u \bar{u} \quad (17)$$

$$\frac{P_d}{I_{dc}} = -\frac{1}{[G_x^{-1}]_{31}} \quad (18)$$

$[G_x^{-1}]_{31}$ 为 $[G_x^{-1}]$ 的三行一列元素.

$$[G_x^{-1}]_{31} = \frac{G_{x13}}{\det(G_x)} \quad (19)$$

G_{x13} 是矩阵 G_x 的一行三列元素的余子式.

$$\det(G_x) = \frac{\partial P_{dc}}{\partial I_{dc}} \frac{\partial Q_{ac}}{\partial} \frac{\partial P_{ac}}{\partial U} \frac{\partial P_{dc}}{\partial I_{dc}} \frac{\partial P_{ac}}{\partial} \frac{\partial(Q_c - Q_{dc} - Q_{ac})}{\partial u} - \frac{\partial Q_{dc}}{\partial I_{dc}} \frac{\partial P_{dc}}{\partial u} \frac{\partial P_{ac}}{\partial} \quad (20)$$

代入上式中各偏导数方程,得:

$$\det(G_x) = \frac{4C}{K} \cos(\mu) * \left[-P_{dc}^2 + \left(\frac{U^2 \cos}{|Z|}\right)^2 + \left(\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c + Q_{dc}\right) \left(\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c + Q_{dc} - 2P_{dc} \tan(\mu)\right) \right] \quad (21)$$

$$G_{x13} = -\frac{\partial(P_{dc} - P_{ac})}{\partial U} \frac{\partial Q_{ac}}{\partial} + \frac{\partial(Q_c - Q_{dc} - Q_{ac})}{\partial U} \frac{\partial P_{ac}}{\partial} \quad (22)$$

同样,代入各个偏导数表达式可得结果多项式,该多项式和 $\det(G_x)$ 的多项式结果之间不存在公因式,不能约简.由此可知,当 $\det(G_x) = 0$ 时, $P_d / I_{dc} = 0$ $\det(G_x) = 0$ 就是满足 HVDC 取得传送功率极限的条件.

4 换流节点电压稳定性分析

4.1 定功率控制模式下的电压稳定性分析

本文利用经典的电压稳定判据对换流节点电压稳定进行分析,即采用 dQ/dU 判据. Q 为假设发电机电动势 E 模值保持不变,并保持发电机送到负荷母线的有功功率与负荷取用的有功功率相平衡的条件下,负荷消耗的无功功率与发电机所提供的无功功率之差 (在本模型中 $Q = Q_{ac} + Q_{dc} - Q_c$), U 为节点电压.当 $\frac{dQ}{dU}$

> 0 时,表示节点电压增加,换流母线送出的无功增加,需要的无功补偿注入也要增加,节点工作在稳定状态,且该值越大表示电压越稳定.当节点电压稳定情况恶化时,该值逐渐减小;当该值减小到零时表示微小的无功功率扰动将使节点电压崩溃,节点进入电压不稳定工作状态.当 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 时,节点电压增加,送出的无功反而减小,需要的无功补偿也减小,显然是电压不稳定状态.列节点混合交直流潮流方程如下:

$$P = P_{dc} - P_{ac} \quad (23)$$

$$Q = Q_{ac} + Q_{dc} - Q_c \quad (24)$$

线性化并写成矩阵型式如下:

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_P & J_{PU} \\ J_Q & J_{QU} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ U \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \mu \\ U \end{pmatrix} \quad (25)$$

式中 J 为潮流方程的 Jacob 矩阵, J_P 、 J_{PU} 、 J_Q 、 J_{QU} 分别是 Jacob 矩阵中有功和无功潮流平衡式相对于功角和节点电压的矩阵因子.

设注入节点的有功功率在分析过程中为零,即 $P = 0$,采用定功率控制方式 $P_d = 0$,逆变器端恒角控制, $\mu = 0$ 则 $\frac{\partial P_{dc}}{\partial U} = 0$,根据式 (25) 可得:

$$\frac{Q}{U} = \frac{\det(J)}{J_P} \quad (26)$$

其中:

$$\begin{aligned} \det(J) &= \frac{\partial(P_{dc} - P_{ac})}{\partial U} \frac{\partial Q_{ac}}{\partial} - \frac{\partial P_{ac}}{\partial} \frac{\partial(Q_{ac} + Q_{dc} - Q_c)}{\partial U} \\ &= \frac{-1}{U} \left[-P_{dc}^2 + \left(\frac{U^2 \cos}{|Z|}\right)^2 + \left(\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c + Q_{dc}\right) \left(\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c + Q_{dc} - 2P_{dc} \tan(\mu)\right) \right] \end{aligned} \quad (27)$$

$J_P = -\frac{\partial P_{ac}}{\partial}$,故而:

$$J_p = - \left[\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c + Q_d \right] \quad (28)$$

比较式(21)和式(28)可见,满足 $P_d / I_{dc} = 0$ 的条件正是 $Q / U = 0$ 条件,也就是说在定功率控制方式下, HVDC 的功率传送极限就是换流节点的电压稳定极限。

4.2 定电流控制方式电压稳定性分析

在定电流控制方式下, $I_{dc} = 0$, 逆变器端仍采用恒息弧角控制 $\mu = 0$ 将该条件下的偏导数方程代入式(27)中,

$$\begin{aligned} \text{del}(J) = & \frac{-1}{U} \left(\left(\frac{U^2 \cos}{|Z|} \right)^2 - P_{dc}^2 \right) - \frac{1}{U} \left(P_{dc} - \frac{U^2 \cos}{|Z|} \right) \left(2P_{dc} + \frac{2P_{dc} \cos(\alpha + \mu)}{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)} \right) - \\ & \frac{1}{U} \left(\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c + Q_d \right) \left(2Q_d - 2P_d \frac{\sin(\alpha + \mu)}{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)} \right) - \\ & \frac{1}{U} \left(\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c + Q_d \right) \left(\frac{U^2 \sin}{|Z|} - Q_c - Q_d \right) \end{aligned} \quad (29)$$

$J_p = \frac{\partial P_{dc}}{\partial \mu}$ 同式(28), 该表达式和 HVDC 的功率传送极限之间没有明显的函数关系, 应该采用其他分析方法, 比如函数图形来加以分析。

5 实例分析

本文采用文献[3]中的一个 HVDC 模型对结果进行验证, 在该模型中变压器容量 $S_T = 1.15 P_{dN}$, 短路比 $u_k \% = 18\%$, 息弧角 $\alpha = 18^\circ$, 分接头位置 $tap = 1$ 额定工况下换流器所消耗的无功功率全部由并联电容器补偿, 即 $Q_{cN} = Q_{dN}$, 电网等效交流系统阻 $|Z| = 1/3$, 即 $SCR = 3$, 抗阻抗角 $\phi = 90^\circ$ 首先按照文献[1]推荐的方法求取系统 MPC 曲线, 然后在各个运行点分别计算定功率控制模式和定电流控制模式下的电压稳定指标 $VSI = \frac{Q}{U}$, 结果如图 2 所示。

由图 2 可见, 在定功率控制方式下, 随着 HVDC 输送功率增加, VSI 不断下降, 在输送直流功率的峰值点到达电压稳定临界点。

由图 3 可见, 在定电流控制方式下, VSI 始终大于零, 换流节点电压稳定。由此可知换流节点的电压稳定性和直流传送功率之间有关系, 随直流传送功率增加, 电压稳定性下降, 但是直流传送功率的极限并非电压稳定的失稳临界点, 直流传送功率并非电压失稳的决定性因素。

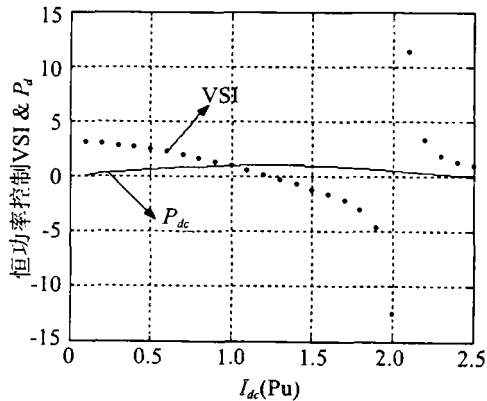


图2 定功率控制方式VSI和 P_{dc} 与 I_{dc} 的关系, $SCR=3$
Fig.2 Relationship between VSI and P_{dc} , I_{dc} in constant power control mode

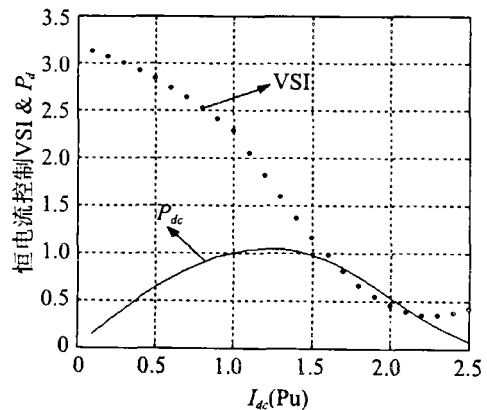


图3 定电流控制方式VSI和 P_{dc} 与 I_{dc} 的关系, $SCR=3$
Fig.3 Relationship between VSI and P_{dc} , I_{dc} in constant DC current control mode

在实际工程中, 一般在整流侧采用定功率或定电流控制方式, 而在逆变侧采用定直流电压控制方式。在南方电网的天广、贵广和三广三个直流系统中, 整流侧可以采用定电流或定功率控制方式。直流输电系

统的整流环节是一个电流反馈控制环节,所谓定电流控制就是电流给定不变,而直流电压则可以随交流换相电压而改变.比较而言,定功率控制方式更加便于调度员的功率调度操作,在这个控制方式下,必须根据功率给定和直流电压来计算直流电流给定值.定电流还是定功率控制方式对电压稳定问题的影响至今在学术界没有明确的解释,但一般认为采用定电流控制方式更加有利于系统稳定,本文的推导结果也证明了这一点.

6 结论和分析

本文利用一个常用的简化 HVDC 输电系统模型详细分析了直流传送功率极限和换流节点电压稳定性之间的关系.证明不同控制方式下,这个关系是不同的.在定功率控制方式下,随传送直流功率的增加,换流节点的电压稳定性不断变差,且直流功率传输极限就是换流节点电压稳定极限.而在定电流控制方式下,换流节点电压稳定性虽然也随直流传输功率增加而变坏,但直流传输功率却不是换流节点电压失稳的决定性因素.

这个结论的得出实际上在得出直流传输功率极限的条件要求 $\det(G_x) = 0$ 和换流母线电压稳定的极限点处要求 $\det(J) = 0$ 的结论时就可以确定,参考 G_x 和 J 的表达式可见,在这个模型下, $\det(J) = 0$, 并且在恒功率控制条件下 $P_{dc} = 0$, 则必然 $\det(G_x) = 0$, 否则, 这个结论就不成立. 但本文想要做出的另外一个贡献却是通过推导功率极限条件的关系表达式来为以后的研究打下一个基础.

前已述及,短路比 SCR 或 $ESCR$ 是直流系统传送功率和工作时电压稳定性的决定性因素,在选择合适的基值后,短路比就是本文的极限条件公式表达式中的 $1/|Z|$,利用本文的公式推导就可以确定设计 HVDC 时所必须确定的临界短路比,本文所采用的分析方法丰富了对 HVDC 输电进行研究的手段.

参考文献:

- [1] Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Locations Having Low Short - Circuit Capacities IEEE Std 1204 - 1997.
- [2] Franken B1 Analysis of HVDC converters connected to weak ac system [J]. IEEE Transaction on Power Systems 1990, 5 (1): 235 ~ 242
- [3] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [5] 浙大发电教研组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982
- [6] Carson W. Taylor Power System Voltage Stability [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [7] Prabha Kundur Power System Stability and Control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [8] Sned T. Analysis of power/voltage stability of HVDC converters in AC system [J]. Proceedings of the IEE 5th international conference on AC and DC transmission, London, England, 1991, (345): 395 ~ 397.
- [9] Denis Lee Hau Aik, et al Voltage stability analysis of Multi - infeed HVDC system [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12 (3): 1309 ~ 1317.
- [10] Sned T. A new approach to AC/DC Power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 16 (3): 1238 ~ 1244.
- [11] Andersson G Improving voltage stability in power system with HVDC converters IEE international conference on advances in power system control, Operation and management, 1991.
- [12] 余贻鑫. 电压稳定研究述评 [J]. 电力系统自动化, 1991, 23 (21): 1 ~ 8
- [13] 段献忠. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (4): 9 ~ 12