

# 基于预估 校正技术的改进奇异值指标

王昆,彭昱,周玮,孙辉

(大连理工大学电气工程系,辽宁 大连 116024)

**摘要:**潮流雅可比矩阵最小奇异值可用来评估系统电压稳定裕度。但这种方法受到发电机无功出力越限的影响,给出的结果不够精确。该文致力于改进这一裕度指标,为此提出了利用预估 校正技术的算法来快速找到系统中电压崩溃点之前发电机无功越限信息,并利用这些信息修正潮流雅可比矩阵,使得其阶数不再受到发电机无功越限的影响,从而改进了最小奇异值裕度指标的线性性。给出了一个 IEEE-14节点网络算例并得到预期结果。最后给出了结论,即利用预估 校正技术有效地克服了最小奇异值指标的阶跃性,提高了潮流雅可比矩阵最小奇异值作为裕度指标的可靠性。

**关键词:**电压稳定; 负荷裕度; 奇异值; 预估 校正

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0034-04

## 0 引言

随着电力系统规模和复杂性的不断发展,电压稳定的问题显得越来越突出,具体表现为一系列大规模停电事故的发生。尤其是自 20 世纪 70 年代以来,因电压失稳而导致系统瓦解的事故在国内外一些大电网中多次发生,造成长时间大面积的停电和巨大的经济损失<sup>[1~3]</sup>。这类事故的一个共同特点是:系统发生扰动时,其频率和角度基本维持不变,而某些节点电压持续下降且不可控制,最终导致系统损失大量负荷或瓦解,这类事件称为电压失稳或电压崩溃<sup>[1]</sup>。为了防止电压失稳和电压崩溃事故,调度运行人员最为关心的是:当前电力系统运行状态是不是电压稳定以及系统稳定裕度有多大。因此必须制定一个确定电压稳定程度的指标,以便调度运行人员做出正确的判断,采取相应的对策。为此有很多国内外学者从不同的方面提出了许多指标<sup>[4]</sup>。其中最小奇异值指标比较常用,因此本文着重对该指标进行了研究并改进。

潮流计算中,雅可比矩阵 J 的最小奇异值被作为接近静态电压稳定极限的一个指标,最小奇异值大小用来表示所研究的运行点和静态电压稳定极限之间的距离。文献 [5] 作者曾用该方法对四川电网电压静态稳定性进行了研究,在实际应用中取得了良好的效果。但是,当系统存在限制,尤其是达到无功限制时,由于 PV 节点和 PQ 节点的转化,使得方程维数发生变化,致使奇异值指标发生突变,且与转化之前的奇异值失去可比性,会影响其线性性。因

此,本文在参考他人对该指标研究工作的基础上<sup>[2,4~11]</sup>,借鉴了连续潮流的预估 校正技术。通过预估环节预先得到发电机无功越限信息,在校正环节利用这些信息,消除雅可比矩阵的阶数变化,从而克服了节点性质的变化所导致的最小奇异值突变,有效地提高了最小奇异值作为电压稳定指标的准确性。

## 1 预估 校正算法

这里,本文先介绍用于寻找各个发电机无功越限信息的算法,就是预估 校正算法<sup>[2]</sup>。

首先考虑下面的参数化潮流方程:

$$f(x, (\ )) = 0 \quad (1)$$

这里:  $x$  是状态向量 (负荷母线的电压幅值和角度, 发电机母线的角度),  $(\ )$  是一个参数向量 (典型的为负荷有功和无功)。在常规潮流方程中,参数是固定的,方程 (1) 用牛顿 - 拉夫逊方法来解未知状态变量  $x$ 。当解出所有状态变量后其它系统变量如线路潮流,系统损耗和电压可调母线产生的无功都可以得到<sup>[2]</sup>。

$$\text{设} \quad = \text{ }_0 + \mu \quad (2)$$

这里  $\text{ }$  是唯一变化的负荷变量。 $\mu$  是一个设定的单位长度向量用来定义系统负荷增长的方向,  $\text{ }_0$  是负荷的初始值。

有了上面的假设,就可以进行预估 校正算法。这里预估是基于灵敏度的观点,即把潮流方程线性化得到粗略的解。为了进行预估,首先对方程 (1) 求全微分:

$$df=0=f_x dx+f \frac{d}{d} d=f_x dx+f \mu d \quad (3)$$

进而得到

$$x=-f_x^{-1} f \mu$$

或写成

$$x=S_x \quad (4)$$

这里  $S_x$  给出了状态量  $x$  对负荷参数  $\mu$  的灵敏度。定义  $Q$  为电压可调母线发出的无功构成的向量。我们感兴趣的极限点,就是向量  $Q$  中的某个注入元素达到最大值  $Q_{\max}$ ,  $Q$  是因变量:

$$Q=Q(x) \quad (5)$$

因此

$$Q=Q_x x \quad (6)$$

将方程 (4) 代入方程 (6), 得到

$$Q=-Q_x f_x^{-1} f \mu \quad (7)$$

或

$$Q=Q-Q_0=S_q \quad (8)$$

这里  $S_q$  给出了无功对于负荷参数  $\mu$  的灵敏度,  $Q_0$  是初始值。

希望能找到  $\mu$  的一个变化来使得每一个无功源达到其极限,即  $\mu$  取什么值可以使得  $Q_j=Q_{\max j}$ , 对于每一个  $j$ 。为了找到这个值,在式 (8) 中设  $Q_j=Q_{\max j}$ , 而

$$Q_{\max j}-Q_{0j}=S_{q,j} \quad (9)$$

这样,所有  $S_{q,j}$  中的最小值可以表示为:

$$\mu_{\min}=\min_j \frac{Q_{\max j}-Q_{0j}}{S_{q,j}} \quad (10)$$

当负荷参数  $\mu$  增加  $\mu_{\min}$  时,将导致第一个发电机越限。从式 (10) 我们可以知道这个首先越限的是哪台发电机,也知道  $\mu$  大概变化多少将导致它越限,式 (4) 给出相应的状态变量  $x$  的变化。这样,就得到了第一个极限点处  $x$  和  $\mu$  的预估值。当然这些值是粗略的。接下来的步骤就是把解修正到精确的越限点。

根据定义,极限点是指随着参数增加某个无功源第一次达到其极限值的点<sup>[4]</sup>。在极限点处,电压值在设定值,所发无功受限于它的极限值。修正环节正是利用了这个条件,即电压和无功都是确定的来进行计算求解的,修正方程组如下:

$$\begin{cases} f(x, \mu) = 0 \\ Q_k(x) - Q_{\max k}(x) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

实际就是在初始潮流方程基础上增加了无功能限制。该方程组的未知量是状态变量  $x$  和负荷参数  $\mu$ 。可以看到方程和未知量数目都增加了一个。

预估环节给出了  $x$  的初始估计,方程 (11) 可以仿照常规潮流解法来计算,在此不再累述。这样就找到了第一个越限点;接下来,把该点作为初始点就可依次把其它极限点找到。至此,利用该算法就准确找到了各台发电机越限的详细信息,为下面改进奇异值指标做好了准备。

## 2 基于预估 校正技术的改进奇异值

### 2.1 奇异值指标特性分析

基于潮流计算的静态分析方法是目前电力系统电压稳定分析的主要方法。其中状态分析方法即雅可比矩阵奇异值分解法能找出电力系统的薄弱环节,以便运行人员采取相应措施改善电力系统的电压稳定性。潮流雅可比矩阵的奇异值作为静态稳定性指标首先是由维尼可夫<sup>[2]</sup>指出的,即潮流雅可比矩阵行列式的符号决定了被研究的系统是稳定的或不稳定的。而把潮流雅可比矩阵  $J$  的最小奇异值作为静态电压稳定性的指标,最小奇异值大小用来表示所研究的运行点与静态稳定极限之间的距离。该指标是对迭代计算收敛后的潮流方程的雅可比矩阵进行奇异值分解得到的,它反映了系统当前运行点与静态稳定极限点的静态距离<sup>[3]</sup>。通常,随着负荷功率的增长,最小奇异值变化呈现比较好的线性特性。但是当系统发生越限,尤其是达到无功越限时,由于 PV 节点和 PQ 节点的转化,使得方程维数发生变化,致使奇异值指标发生突变,且与转化之前的奇异值失去可比性,会影响该指标的线性性<sup>[3]</sup>。

然而,利用预估校正算法预先得到在崩溃点之前发电机无功越限信息就可以解决这个问题。由他人研究的结论知道<sup>[3,5,8]</sup>,产生阶跃的原因是母线类型变化。因此,只要确保没有母线变换类型,就可以达到消除其阶跃现象的目的。而要做到这一点就可以通过计算奇异值时总是把在崩溃点处达极限点的母线作为 PQ 母线处理来实现,具体阐述如下:首先利用第二节提到的算法找到崩溃点之前哪些发电机越限及它们的详细越限次序,要确定在某特定负荷参数的情况下的最小奇异值,第一步就是得到潮流问题的常规解。对于这个潮流解,所有无功源按照标准方式处理。然后当建立雅可比矩阵来求解并评估奇异值时,那么在崩溃点之前无功越限的母线则当作 PQ 节点处理<sup>[5]</sup>,不论它在当前点是否真的达到了极限点。对这些电源来说,它们所产生的多余无功值当作无功负荷来处理。这样,用于求解奇异值的雅可比总是用同样数目的 PQ 母线来建立,所

以当负荷参数改变时最小奇异值就不会再出现阶跃现象了。所以这里关键点就是要找到一个方法把那些无功越限的节点全都找到,然后按照上述方法建立雅可比然后再进行奇异值分解。而这关键一步就是上面第 2 节详细介绍的预估 校正技术。

### 2.2 算法步骤

上面详细分析了奇异值指标的特性,指出了它存在的一些不足并提出了改进措施,总结步骤如下:

第一步:通过预估校正技术找到系统内发电机越限的信息,即在崩溃点之前有哪些发电机越限以及详细越限次序。

第二步:对一特定负荷首先进行常规潮流计算,得到各个节点的实际数据。

第三步:在前两步的基础上修正雅可比矩阵,即在崩溃点之前越限的 PV 节点全按照 PQ 节点处理。PV 节点多发的无功当作无功负荷处理。然后对新建立的雅可比矩阵进行奇异值分解,并提取出最小奇异值作为新的改进的指标。

### 3 计算实例

下面应用本文方法对 IEEE-14 节点数据进行算例分析。负荷增长方式采用了等比例不变功率因数的方式,即

$$\begin{cases} P = P_0 \times (1 + \lambda) \\ Q = Q_0 \times (1 + \lambda) \end{cases} \quad (12)$$

随着负荷参数  $\lambda$  的逐渐增大,用传统奇异值分解和改进奇异值分解分别进行计算,比较最小奇异值的差别。这里需要说明的是 14 节点系统有 2、3、6、8 共四个 PV 节点,按照等比例增长方式,通过预估校正可以知道这 4 个 PV 节点在崩溃点之前都越限了,而且越限次序恰好依次为 2、3、6、8。计算得崩溃点处  $\lambda_c = 0.7781$ 。从  $\lambda = 0$  开始按照等间距为 0.1 逐渐增加负荷,得到原来的和改进的最小奇异值指标如表 1 所示。

表 1 随  $\lambda$  变化对应  $\sigma_{\min}$  变化

Tab 1 The change of  $\sigma_{\min}$  with  $\lambda$

$\lambda$	$\sigma_{\min}$ (原来)	$\sigma_{\min}$ (改进)
0.0	0.546 448	0.415 422
0.1	0.536 731	0.400 894
0.2	0.476 708	0.384 461
0.3	0.340 646	0.340 846
0.4	0.297 390	0.297 790
0.5	0.247 553	0.247 933
0.6	0.186 328	0.186 508
0.7	0.117 510	0.117 520

表 1 是按照  $\lambda$  等间距的增长来取值,所以并没

有详细显示出各个 PV 节点的越限信息。为了更详细地描述最小奇异值指标,论文精确找到了这些点,列于表 2 中。

表 2 各个 PV 节点越限值对照

Tab 2 Limit of each PV node

越限的 节点号	$\sigma_{\min}$	
	原先	改进
2	0.076 920	0.542 152
	0.076 921	0.538 606
3	0.169 030	0.530 611
	0.169 031	0.525 636
6	0.193 948	0.523 333
	0.193 949	0.478 010
8	0.223 402	0.469 683
	0.223 403	0.372 793

用图形描述  $\sigma_{\min}$  随  $\lambda$  变化的趋势,如图 1 所示。

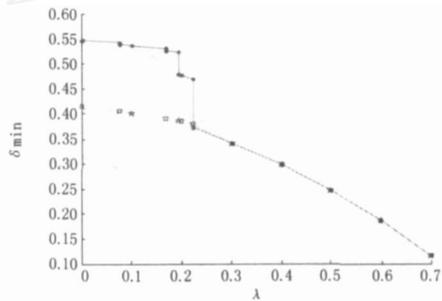


图 1  $\sigma_{\min}$  - 图

Fig 1 Figure of  $\sigma_{\min}$

图 1 中,横坐标是负荷参数  $\lambda$ ,纵坐标是最小奇异值指标  $\sigma_{\min}$ 。实线是原来的最小奇异值变化曲线,虚线是改进后的最小奇异值曲线。为了便于比较对照改进奇异值的效果,放在一张图上。从图 1 可以看出,原先的指标在发电机越限时存在一明显的阶跃现象,改进后的最小奇异值指标明显消除了它,整条曲线更加平滑,线性性更好,实现了改进该裕度指标的目的。另外一个信息是当最后的第 8 号节点越限后,新的最小奇异值指标与原先的指标几乎重合了,这是由于此后二者所用雅可比非常接近的原因。这也从一个侧面反映了本文所提出的改进算法的正确性。

### 4 结论

通过上面的讨论和算例,看出由于改进的雅可比矩阵阶数不再因节点类型变化而改变,因此对其进行奇异值分解得到的新的最小奇异值指标,消除了阶跃现象,具有一定的实用价值。这里在寻找各无功越限点过程中所采用的技术和连续潮流相似,但是又比连续潮流更加快速。

## 参考文献:

- [1] 周双喜,朱凌志,等. 电力系统电压稳定性分析及其控制 [M]. 北京:中国电力出版社,2004.  
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, et al. The Voltage Stability Analysis and Control of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] Hiskens IA, Chakrabarti B B. Direct Calculation of Reactive Power Limit Points[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(2): 121-129.
- [3] 姜勇,周双喜,朱凌志. 电力系统电压静态分析中的二阶指标 [J]. 清华大学学报, 2002, 42(9): 30-32, 34.  
JIANG Yong, ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi. Second-order Indices for Power Systems Steady State Voltage Stability[J]. Journal of Tsinghua University, 2002, 42(9): 30-32, 34.
- [4] 邱晓燕,邱红兵. 基于潮流计算的电压稳定性指标的比较研究 [J]. 四川大学学报, 2002, 34(6): 98-101.  
QIU Xiao-yan, QIU Hong-bing. Comparative Study of Voltage Stability Indices Based on Load Flow Calculation [J]. Journal of Sichuan University, 2002, 34(6): 98-101.
- [5] 吴国梁,刘俊勇,陈谦. 基于 SVD 理论对四川电网电压静稳的实证研究 [J]. 继电器, 2005, 33(15): 50-53.  
WU Guo-liang, LU Jun-yong, CHEN Qian. Singular Value Decomposition Method Applied to Sichuan Power Grid[J]. Relay, 2005, 33(15): 50-53.
- [6] 潘文霞,陈允平,沈祖诒. 电力系统电压稳定性研究综述 [J]. 电网技术, 2001, 25(9): 53-56.  
PAN Wen-xia, CHEN Yun-ping, SHEN Zu-yi. A Survey of Voltage Stability Studies[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 53-56.
- [7] 冯治鸿,刘取,倪以信,等. 多机电力系统电压静态稳定性分析——奇异值分解法 [J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3): 12-21.  
FENG Zhi-hong, LU Qu, NI Yi-xin, et al. Analysis of Steady State Voltage Stability in Multimachine Power System by Singular Value Decomposition Method [J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(3): 12-21.
- [8] Lof PA, Anderson G, Hill D J. Voltage Stability Indices of Stressed Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 326-335.
- [9] 吴国梁,刘俊勇,陈谦. 奇异值分析法对四川电网电压静稳极限的分析预测 [J]. 四川电力技术, 2005, (1): 4-7, 20.  
WU Guo-liang, LU Jun-yong, CHEN Qian. Application of Singular Value Decomposition Method to Analysis and Prediction for Voltage Steady-state Stability Limit of Sichuan Power Grid[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2005, (1): 4-7, 20.
- [10] 段献忠,何仰赞,陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36-41.  
DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. On Some Practical Criteria and Security Indices for Voltage Stability in Electric Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(9): 36-41.
- [11] 陈谦,吴俊勇,刘国梁. 含最优乘子的连续潮流算法和奇异值法的电压静态稳定分析软件开发 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 35-38, 42.  
CHEN Qian, LU Jun-yong, WU Guo-liang. Development of Power System Voltage Stability Analysis Software Using Continuation Method and Singular Value Decomposition Method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(4): 35-38, 42.

收稿日期: 2006-03-05; 修回日期: 2006-05-18

作者简介:

王 昆 (1981 - ), 男, 在读硕士, 主要从事电力系统电压稳定性分析研究; E-mail: kunwang335@163.com

彭 昱 (1973 - ), 女, 在读博士, 主要从事电力系统电压稳定、优化的研究工作;

周 玮 (1981 - ), 女, 在读博士, 从事电力系统稳定、优化研究;

孙 辉 (1964 - ), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、稳定和电能质量的研究工作。

### Improved singular value index based on predictor/corrector technique

WANG Kun, PENG Yu, ZHOU Wei, SUN Hui

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The minimum singular value of the power flow Jacobin matrix can be used to evaluate the voltage stability margin. But it is affected by the generator encountering reactive limits, so the results are not very exactly. To improve this margin index, this paper proposes a predictor/corrector technique which can quickly find the limit points before the voltage collapse of the system and then the Jacobin matrix of power system can be modified to keep its dimension unchanged at the limit points. So the minimum singular index with

(下转第 54 页 continued on page 54)

自建内存数据库,极大地丰富了协议转换器的功能。

随着电力数据网的发展,电力通讯网络化已成为电力行业发展的趋势之一。协议转换器最大限度地延长了老式电力通讯装置的使用期限,其实用性和经济性十分突出。在整合了 Web 服务器之后,能有效降低设备运行维护费用,提高设备管理水平,为在线稳定控制系统的实施提供了通讯保证。

#### 参考文献:

- [1] 周良松,彭波,夏成军. 一个实用的电力系统分层决策稳定控制系统 [J]. 继电器, 2000, 28(4): 16-19.  
ZHOU Liang-song, PENG Bo, XIA Cheng-jun. Study on New Transient Stability Control Pattern with On-line Hierarchy Decision-making and Control [J]. Relay, 2000, 28(4): 16-19.
- [2] 唐岳,廖力清,汪治国. IEC 60870-5-104 远动规约在电网调度中的应用 [J]. 电力系统通信, 2005, 26(15): 50-54.  
TANG Yue, LIAO Li-qing, WANG Zhi-quo. Application of IEC 60870-5-104 Telecontrol Protocol in Power Network Dispatching System [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005, 26(15): 50-54.
- [3] DL 451 - 1991, 新部颁 CDT 规约.  
DL 451 - 1991, CDT Protocol [S].
- [4] IEC 60870-5-104, 远动设备及系统 [S].  
IEC 60870-5-104, Telecontrol Equipment and System [S].
- [5] IEC 60870-5-104 Series User's Manual [Z].
- [6] 刘念,段斌. IEC 60870-5-104 远动协议的一种安全报文探讨 [J]. 电力系统自动化, 2005, 19(2): 93-96.  
LIU Nian, DUAN Bin. Discussion on Security Message of IEC 60870-5-104 Telecontrol Protocol [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 19(2): 93-96.
- [7] 朱科,周良松,周启文. 嵌入式以太网在稳定控制装置中的应用 [J]. 继电器, 2006, 34(3): 66-70.  
ZHU Ke, ZHOU Liang-song, ZHOU Qi-wen. Application of Embedded Ethernet in Stability Control Device [J]. Relay, 2006, 34(3): 66-70.

收稿日期: 2006-03-31; 修回日期: 2006-04-25

#### 作者简介:

王滔 (1982 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向主要为电力系统稳定控制及电力通讯的研究; E-mail: wangtao\_8282@tom.com

周良松 (1967 - ), 男, 副教授, 主要从事电力系统稳定与控制、电力系统自动控制及计算机监控的研究;

朱科 (1981 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向主要为电力系统稳定控制及电力通讯设计的研究。

### A new design of telecontrol protocol convert for stability device

WANG Tao, ZHOU Liang-song, ZHU Ke

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper designs a new protocol convert. It mainly aims the need of Ethernet communication for telecontrol apparatus of power system, which need to keep the CDT protocol in substation and use IEC60870-5-104 protocol in the telecontrol communication. The transport of IEC60870-5-104 protocol bases on TCP/IP in the application layer. Especially, for the characteristic of stability device, several improvement, such as celerity for some important command frame, security for some file, are adopted. In addition, two new functions are added. They are web server and history data research in a database. In terms of hardware, I-7188EG embedded control is used. By the test, all the anticipating functions are validated, except for the celerity of command frame. This protocol convert, which prolongs the service life of some old telecontrol apparatus, can play a important role in economical efficiency and practicability.

**Key words:** protocol convert; telecontrol communication; CDT protocol; IEC60870-5-104; embedded control

(上接第 37 页 continued from page 37)

discontinuity due to the attainment of generator capability limit can be greatly improved with good linearity. This method is applied to IEEE-14 bus system with promising results. Finally, the conclusion of the paper is given. Using predictor/corrector technique can overcome the break of the minimum singular value index effectively, and improve the reliability of the minimum singular value as a margin index of voltage stability.

**Key words:** voltage stability; load margin; singular value; predictor/corrector