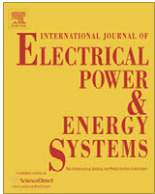




可在目录列表 ScienceDirect

电力和能源系统

期刊主页：www.elsevier.COM /定位/我jepes



考虑AVR动力系统和PSS输出限制器的稳定性分析

罗德里戈·A·拉莫斯\*

Escola的德ENGENHARIA去圣保罗卡洛斯 - USP, 电气工程, 大道.Trabalhador Sancarlense, 400, 13566-590圣保罗卡洛斯SP, 巴西

articleinfo

文章历史：

收到28 2007年5月

在收到的修订表格11 2008年10月接受二零零八年十月十八日可  
在线XXXX

关键词：

小信号稳定性低频振荡AVR PSS

终结限制器

抽象

在电力系统中的小信号稳定性分析使用其非线性模型的线性化的近似当受到小的扰动分析其行为。在这种方法中，有一个隐含的假设是，扰动足够小，从而相对于所述非线性模型的线性近似的不精确保持在一个可接受的范围内。这限制了线性化模型的有效性的下，所得到的模型中的平衡条件附近。通常，这邻域的大小和形状是由在状态空间，其中没有保护限制器活性的区域来确定。然而，也有可能是在一个相对较小的扰动驱动系统，这样的区域，但仍存在对系统的稳定运行构成威胁的情况。本文提出了到FI的方法第二系统的吸引区域，使用线性化模型通过添加AVR和PSS输出限制器，以这样的方式，该区域包括其中限制器被激活的状态空间的部分地区，因此加宽平衡点的稳定性有保证的附近。将所得到的结果表明，这种吸引力面积小于由其中线性近似是有效的区域定义附近德音响大得多，并且还表明，线性化模型，其中添加AVR和PSS输出限制器，可以提供非线性的很好的近似系统轨迹即使在限制器活性的区域的某些部分。在这个区域包括状态空间，其中限制器被激活的区域的部分，因此加宽平衡点的稳定性有保证的附近这样的方式。将所得到的结果表明，这种吸引力面积小于由其中线性近似是有效的区域定义附近德音响大得多，并且还表明，线性化模型，其中添加AVR和PSS输出限制器，可以提供非线性的很好的近似系统轨迹即使在限制器活性的区域的某些部分。

2008年保留爱思唯尔有限公司保留所有权利。

1.简介

自上个世纪中叶的小信号稳定性问题已报告在电力系统。通常情况下，他们在发生不良阻尼机电振荡的形式，并且需要额外的控制回路，以防止这些振荡被有害的系统运行 [1]。

最常用的类型的控制器，以提高这些振荡的阻尼被称为电力系统稳定器（PSS），它基本上是一个经典的相位补偿器 [2]。虽然电力系统具有高度的非线性行为，则PSS是由在频域中传统的控制技术设计的，涉及围绕标称工作点线性化，控制器的设计在线性标称模型和 后验 在该系统的闭环非线性模型的控制性能VERI音响阳离子，各种操作条件下 [3]。虽然这种做法仍是典型的行业惯例，也有内在它的两大问题，这对新的控制器设计程序的动机几种不同的提案（ [4,5] 和 [6] 是实施例）。所述第一个之一是使用了控制器的设计标准模型，仅在其日常操作的一小部分，其可以表示系统的行为，因为

电力系统的运行点通常会遇到大的变化。

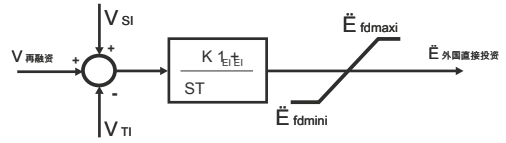
第二个（这是本文的主要目标）的事实是，电力系统动态是高度非线性 [3]，因此，所设计的线性控制器的有效性限制到用于线性化的平衡点的小邻域内。虽然这是一个众所周知的事实，这附近的实际形状和尺寸从来没有在设计阶段解决。通常情况下，所设计的控制律的有效性VERI科幻阳离子，无论是在稳定性和性能方面，在设计完成后进行（通过闭环非线性模型的数值模拟）。如果此模拟的结果匹配接近其各自的平衡点的标称线性化模型的预测结果和对于其他选择的工作点上可接受的为好，则设计被认为是成功的。

在暂态稳定分析，其中采用直接的电力系统的非线性模型，对于特定的操作条件的吸引区域的确定是一个典型的做法 [7]。当涉及到电力系统小信号稳定性研究，但是，这个问题最近才成为深入研究的焦点。当然，稳定的线性模型是整个状态空间有吸引力的，但问题是：在动力系统方面，从平衡点有多远能状态走，这样的动力仍然可以由线性模型来表示？另一个问题是紧跟这一项：是否有可能为国家任何走得更远，没有不稳定的风险？

\* 电话：+55 16 3373 9348; 传真：+55 16 3373 9372。

电子邮件地址：ramos@sel.eesc.usp.br

这些问题已经引起了有关与该线性模型可以准确地反映电力系统的非线性特性的精确度几个不同主题的最近的一些调查。作为例子, [8]和[9]提出的方法评估限制器在自动电压调节器 ( AVR ) 和PSS输出上电力系统的小信号稳定性的影响。然而, 这两篇参考文献忽视的事实是, 对于这些输出, 以达到其上限的限制, 系统状态必须偏离其平衡点相当远, 因此, 小信号的概念并不是在这种情况下定义很好德网络连接。其它非线性的 ( 例如, 由网络方程引入, 例如的那些 ) 可能超过系统动力学显著的, 因此, 线性模型的在描述电力系统响应精度的效果可能会受到影响。



图。1。一阶AVR的框图与输出限制器。

在发生器的终端总线的电压的值 一世。在本文中, 一个静态模型被用于网络和负载被假定为恒定admitances, 因此它们可以被包括在网络的节点admittance矩阵。参数 \$G\_{ik}\$ 和 \$B\_{ik}\$ 在 (4), (5) 分别是转移的实部和虚部总线之间admittances 一世 和 \$k\$。

在这项研究中, AVR被假设为一阶线性稳压器, 其框图中给出 图. 1。在这张图, \$k\_e\$ 和 \$\tau\_e\$

分别是所述AVR增益在稳定状态和AVR时间常数。

它以突出的AVR的输出饱和和限制器的存在是非常重要的 图. 1。此限幅器是必要的, 以避免过度的音响场电压的期间, 在电力系统运行相对大的干扰的应用, 和在暂态稳定分析典型地建模。然而, 用于小信号稳定性研究线性化模型忽视的假设状态不漂移过于远离平衡点下这些限制器 ( 并因此AVR输出的范围内 )。

这个推理得到以下结论 ( 这是关系到最后一节的第一个问题 ) : 当发电机不重仓 ( 因此非线性的效果是不是它的操作非常高 ), 线性模型是有效的内其中限制器不活跃的区域。一些主观显然是包含在术语“重仓”, 这需要一个工程判断来决定有多少不精确性可以线性化模型相对于非线性模型的一个反应是不能容忍的。

然而, 相对小的扰动不会很少发电机运到工作区, 其中限制器活跃, 但仍然有其运行稳定无显著威胁。线性化模型是在这种情况下无用的, 因为, 如果它是稳定的, 那么它是在状态空间无处不在的吸引力, 所以它不提供在限制器活跃的区域系统稳定性的任何信息。因此, 本文将询问以下问题: 使用线性化模型, 并考虑到限制器的存在, 是有可能到FI ND一个regionwhere发电机的稳定操作保证, 即使当限制器活性? 答案是肯定的, 而本文将在下一节展示如何。

### 3.估算的吸引区域限制器的存在

在继续回答前面的问题, 我们要提醒的是电力系统的小扰动的响应可能是振荡的, 因此, 一个PSS的设计必须为这些振荡阻尼充足, 如部分中提及 1。图2 示出了PSS的典型框图, 它

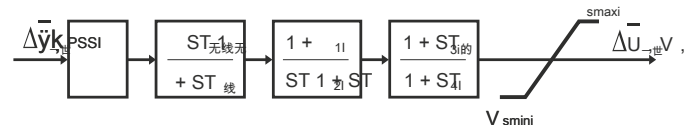


图2中. PSS的框图与输出限制器。

## 2.电源系统建模

在典型的假设, 一组非线性方程来建模多机电力系统的操作可以是以下:

$$\begin{aligned} d - \pi \frac{1}{2} X - \pi X & \quad d 1 p \\ X - \pi \frac{1}{2} H - \pi P_{Mi} & \quad d 2 p \\ \dot{E}_{0\pi} \frac{1}{\omega_0} & \quad d 3 p \end{aligned}$$

在 (1) - (3), \$d - \pi\$ 是转子角, \$X - \pi\$ 是转子速度 ( 相对于同步参考 ), \$\dot{E}\_{0\pi}\$ 是正交轴的瞬态电压, 为 \$i = 1, \dots, N\$, 哪里 \$\bar{n}\$ 是感应发电机假定系统中的大部分被建模为在无限总线的等价数量。参数 \$X\$ 在同步速度的绝对值 ( 以弧度每秒 ), 和DE音nitions在这些方程中的其他参数中可以找到 [10]和[2]。以上给出的组非线性微分方程由下代数方程约束:

$$\begin{aligned} - \pi \frac{1}{2} X_n & \quad d 4 p \\ - \pi \frac{1}{2} X_n & \quad d 5 p \\ V_n \frac{1}{2} \dot{E}_{0\pi} \cos d - \pi p & \quad d 6 p \\ V_n \frac{1}{2} \dot{E}_{0\pi} \sin d - \pi p & \quad d 7 p \\ V_n \frac{1}{2} \dot{E}_{0\pi} \cos d - \pi p & \quad d 8 p \end{aligned}$$

在 (4), (5), 一世 \$\pi\$ 和 一世 \$\pi\$ 被分别的电流的实部和虚部由发电机注入 一世 到传输网络中, 通过它们的等效内部总线。在 (6) - (8), \$V\_{Ri}\$, \$V\_{Qi}\$

和 \$V\_{Ti}\$ 分别是实部, 虚部和绝对

可以看出，该控制器还拥有在其输出饱和限制器 [2]。因此，在回答前面的问题当两个AVR和PSS输出限制器必须加以考虑。

在PSS的设计的第一步是从表现出良好的可观测相对于所关心的振动模式的功率systemmodel的输出信号的选择。通常，发电机的转子速度的良好候选这样的信号选择。输入到功率systemmodel也通常选择作为稳定信号  $V_{SI}$  加入到AVR求和点，在看到 图. 1。在接下来的步骤，公式。(1) - (3) 耦合与由在框图中所表示的那些 图. 1 和algebraic方程

(4) - (8) 是在所得到的方程取代的，所以前一组差分代数方程的成为电力系统的非线性statespace表示。该非线性状态空间然后围绕通过的音响SPECI C值定义的操作用德连接线性化  $P_{MI}$  和  $V_{REF}$  一世。其结果是在形式的线性状态空间模型

$$\begin{aligned} \dot{D}X\% \text{ 一个 } dX\% \text{ 乙 } d\bar{u} & \\ d\bar{y}\% C dX & \end{aligned} \quad \begin{aligned} d9p \\ d10p \end{aligned}$$

在方程。(9) 和 (10) 时，状态向量  $dX$  通过从非线性模型的状态的平衡值的偏差组成。输入  $d\bar{u}$  是从的平衡值的偏差

$V_{SI}$  在信号 图. 1，输出  $d\bar{y}$  是从所述同步速度发电机的转子转速的偏差。

对于PSS设计行业的典型做法涉及相位补偿和极点配置技术的组合来确定所需的PSS参数 [11] 所述PSS的设计和放置在发电机...后，闭环系统可以描述为

$$D X \% \text{ 一个 } \alpha d X \% d \text{ 一个 } \beta BK \beta d X \quad d11p$$

哪里

$$\text{一个 } \alpha \% \text{ 串接盒 } c. \quad d12p$$

和一个  $c$ 、 $Z_c$  和  $C_c$  是一个状态空间实现的PSS传递函数。

在 (11) 时，状态向量  $X$  包含的状态变量 (9) 加上其他三个状态变量中提到的PSS。需要注意的是矩阵 一个  $\alpha$  在条款分割 一个 和  $BK$ 。这种分裂是由以使限制器的闭环线性化系统的分析处理。矩阵 乙 选择音响场电压的偏差  $d\bar{E}$  外国直接投资

和稳定信号的偏差  $dV_{SI}$  为一起的有限的输入和矩阵  $k$  通过关闭相应的输入信号注入每个这些变量的循环。矩阵  $k$  由AVR收益组成  $k_B$  和PSS收益  $k_{PSS}$ ，在于它喷射音响场电压转换成的微分方程这样的方式  $D_{\text{—}}$

$$\dot{E}_0 \text{ 齐和 PSS} \quad \text{输出变换成方程 } D_{\text{—}} \quad \dot{E}_0 \text{ 外国直接投资。}$$

由术语创建的输出  $k dX$  在 (11) 以这样的方式被限制该

$$d\bar{E}_{dmini} \text{ 6 } d\bar{E}_0 \text{ 外国直接投资 6 } d\bar{E}_{dmaxd} \quad d13p$$

$$dV_{dmini} \text{ 6 } dV_{SI} \text{ 6 } dV_{dmaxd} \quad d14p$$

为简单起见，我们会考虑在此的工作， $d\bar{E}_{dmini} =$

$$d\bar{E}_{dmaxd} \text{ 和 } dV_{dmini} = dV_{dmaxd}.$$

让我们再回到在最后一节的最后提出的问题，我们感兴趣的是了解一个区域的线性化模型的稳定性哪里 (11) 得到保证，即使输出限制器德音响以上定义是有效的。在另一方面，它不是有趣该区域是任意大的，因为，即使在轻负载的发电机，从平衡点工作相距甚远当非线性行为变得显著的。

因此，我们的分析必须限制到一组感兴趣的预确定的初始操作条件下，具有代表性的从系统中的平衡的扰动可能的结果。这些条件可以根据从意外事件列表的分析，这是在工业实践的典型产生的状态的初始故障后的值来选择。这些值将决定如何远离平衡的动力将开始，我们想知道，即使这样的工作条件导致输出限制器的激活系统将是稳定的。下面的命题提供了一种方法来回答这个问题。

**命题1.** 给定一组  $dX_0$ ， $J=1, \dots$ ，感兴趣的初始条件 $R$ ，如果存在适当尺寸的矩阵  $P=T>0$ ，

$F$ ， $G$ ， $H$  和对角矩阵  $d=\text{诊断} (d=)$  和  $L=\text{诊断} (L=)$ ， $L=1, \dots, 2N$ ，使得

$$\begin{aligned} 264 & \quad 375 < 0 \\ \text{中号 } t_1 \text{ 中号 } t_2, \text{ 中号 } t_3, & \end{aligned}$$

$$\text{中号 } z_1 \text{ 中号 } z_2 \text{ 中号 } t_3, \quad d15p$$

$$\text{中号 } z_1 \text{ 中号 } z_2 \text{ 中号 } z_3 \quad \#$$

$$\begin{aligned} P & \quad \text{金边 1 大号 } z_1, z_2, z_3 \text{ 乙 } k_{act} \quad P0 \quad d16p \\ d1 \text{ 大号 } z_1, z_2, z_3 \text{ 乙 } k_{act} \text{ 乙 } d_{max} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P & \quad \text{金边 1 大号 } z_1, z_2, z_3 \text{ 乙 } k_{PSS} \text{ 乙 } P0 \quad d17p \\ d1 \text{ 大号 } z_1, z_2, z_3 \text{ 乙 } k_{PSS} \text{ 乙 } V_{z, \text{ 大号 } z_3} & \end{aligned}$$

$$dX_{t0} J P dX_{t0} G1; \quad J \% 1; \dots; [R \quad d18p$$

$$06 \text{ 大号 } 6 \text{ 一世} \quad d19p$$

对于  $k=1, \dots, n$ ，其中

$$\text{中号 } t_1 \% F d \text{ 一个 } \beta BK \beta d \text{ 一个 } \beta BK \beta t F t \quad d20p$$

$$\text{中号 } z_1 \% G d \text{ 一个 } \beta BK \beta ? F t \beta P \quad d21p$$

$$\text{中号 } z_2 \% ? GG t \quad d22p$$

$$\text{中号 } z_1 \% H d \text{ 一个 } \beta BK \beta \beta z_1 F t \beta DLK \quad d23p$$

$$\text{中号 } z_2 \% ? H \beta z_1 t \quad d24p$$

$$\text{中号 } z_3 \% ? 2 d \beta HB \beta z_1 H t \quad d25p$$

那么集  $dP: 1 \beta \% F d X2 [R n J d X t P d X G1 G$  是吸引区域的用于系统的估计 (11)，考虑 (13) 和 (14)，并含有  $dX_0$ ， $J=1, \dots$ 。河。

这个命题与每个在它使用的变量的去网络nition的证明，同时，可以发现 [12] 或者，可替代地在，[13]和[14]。他们不会在这里重复，由于空间的限制。集合  $(P, 1)$  处于所述线性化系统的原因为中心的椭圆 (11)，其对应于为所述非线性状态空间建模的电力系统感兴趣的平衡点，并且是一个正不变集，这确保了所有的系统轨迹这一组内发起将保持在它所有  $T>0$ 。由于  $(P, 1)$  含有  $dX_0 J, J=1, \dots$ ， $R$ ，这保证了，对所有感兴趣的初始条件，发电机将是稳定的，即使限制器系统轨迹的一个显著的一部分期间有效。

这个命题的另一个有趣的特性是，由于  $(P, 1)$  含有  $dX_0 J, J=1, \dots$ ， $R$ ，它也包含了多面体

$X_0 \% \text{ 有限公司 } F d X_0; \dots; d X_0 [R G$ ，哪里 有限公司  $\{ \}$  代表的凸包。这意味着，不仅为响应于所选择的初始条件下得到稳定的保证  $dX_0 J, J=1, \dots$ ， $[R$

(其中，如前所述，是代表性的系统中的扰动的可能的结果)，但也包含在所述多面体的响应于任何初始条件  $X_0$  (其中有  $dX_0 J, J=1, \dots$ ， $[R$  作为它的顶点)。因此，可以清楚地看到一个并不需要准确地知道所关心的初始条件，以便能够应用这个命题。换一种说法，

只对状态变量的初始值可容许范围是必需的。

在所有条件 ( 15 ) - ( 19 ) 是线性矩阵不等式, 除了 ( 15 ), 其中包含的条目 中号 3.1 在给定的 ( 23 ) 。此条目包括矩阵变量的产品 DL 在其最后一届, 它引入了一个双线性成 ( 15 ) 。虽然我们不能使用LM I求解直接计算的解决这个问题, 一种算法可以被设计来实现通过反复应用的LMI求解这一解决方案。该算法如下: [12] :

算法

步骤1: 固定 大小 并解决, 为 P, F, G, H, d 和 C, 问题分钟 C

d 26 b

受 ( 15 ) - ( 17 ) 和

d X n j P d X o j 6 C; J % 1; . . . ; R等

d 27 b

第2步: 如果 C> 1, 网络X d 在前述步骤中获得和解决 ( 26 )

受 ( 15 ) - ( 17 ) 和 ( 27 ) 对于 P, F, G, H, L 和 C;

第3步: 如果 C> 1, 去 步骤1。

在此算法中, 可针对此问题由LMI求解器的迭代应用, 如SeDuMi获得快速和可靠的数值解 [15] , 例如。

#### 4.案例研究

在本节中, 先前描述的算法应用到估计两个不同的功率systemmodels的吸引面积。为了保持呈现的概念性质和结果的说明的清晰起见, 第一个测试的系统是在无限总线 ( SMIB ) 系统, 其单线图出示出了选择为一台机器对 图3 。

系统参数的对的SMIB系统的值

图3 有以下几种: X o = 2 p 60弧度/秒, H = 5秒, X d = 1.6 PU, X o d % 0.32号码: ū, 小号 o % 6秒, k E = 100 PU / PU, 和 T E = 0.01秒。系统参数德科幻NE工作点是该值: P \* = 1 PU, V 1 = 1.2649 PU, X E = 0.4 PU和 V REF = 1.0762 PU通过这些参数, 平衡点对应于状态变量以下值: d EQ = 34.7度, X EQ = 1 -

PU, E o o EQ % 1个P : U ;和 E F DEQ = 0.9289 PU ( 其中下标 EQ 表示平衡值 ) 。

由截短的泰勒级数展开线性围绕上述操作点的系统产生了系统动力学在此点附近的线性表示。这个线性表示的本征分析表明, 虽然稳定, 这些动力学显示出非常差的阻尼振荡行为, 由复共轭本征值的给定

0.0007± j 0.0738。因此, PSS必须采用以提高系统的小信号的稳定裕度。使用中所描绘的过程 [11] 中, 下面的参数用于此PSS确定: k PSS = 1.5 PU / PU, TW = 3.0 S, T 1 = T 3 = 0.70秒,

T 2 = T 4 = 0.11秒。

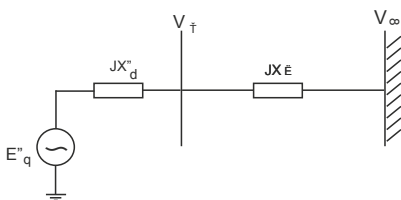


图3. 的第一个 ( SMIB ) 的单线图测试系统。

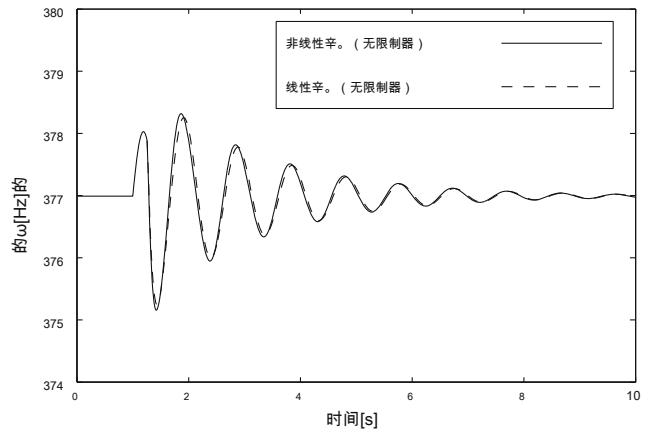


图4. 没有限制器认为 - 线性化的 ( 虚线 ) 的响应和非线性 ( 实线 ) 的模型的比较。

现在我们面临着如下问题: 虽然闭环线性模型, 包括设计PSS, 显示稳定和良好的阻尼特性, 如何准确的预测系统的非线性行为的线性模型? 没有一般和德网络nitive回答这个问题, 因此我们必须依靠模拟和工程判断来评估, 如果 ( 在哪里 ) 这两种表述的差异是可以接受的。

由于线性模型从非线性一个由泰勒级数展开的截断产生, 可以想到的是, 这些差异将成为其是从平衡点周围其中该系统被线性化遥远状态空间的那些区域大。因此, 我们模拟系统的一系列严重扰动的响应, 旨在系统驱动这些地区之一。的序列中表示所有模拟使用MATLAB脚本执行。

图4 提出这些仿真之一。它示出了发电机角速度的在25%的下降在无限总线电压的响应 V 1 并在等效外部阻抗10%的提高 X E, 这可能是一个短路的传输网络中的某个地方发生的结果。这些故障情况发生在 T = 1秒持续到 T = 1.256秒。在此之后, 故障被清除, 系统返回到原来的CON组fi guration。

在 图4 中, 实线是非线性模拟的结果, 在AVR和PSS输出限制器被忽视。的虚线所示, 这是非常接近固体之一, 是与线性化系统的模拟获得的结果。1从这张图, 可以得出这样的结论, 在模拟条件下, 有使用线性模型来表示的非线性之一的动力学时无显著的不精确性。

图5 呈现非线性和线性模拟之间的另一个比较, 先前仿真的相同的条件下。然而这一次, 非线性模拟花费的AVR和PSS输出限制器考虑。的限制被选择为 d E k min = d E k max = 5蒲和 d V SMIN = d V SMAX = 0.1

PU的虚线和实线之间的区别是显而易见的, 并且我们可以得出结论, 通过既分析 图 图4和5, 这种差异完全是由于幅度的存在。其他几个工作点和扰动类似的分析导致了同样的结论。

1 我们注意到线性系统的仿真只对故障后系统进行, 并开始在故障清除的瞬间, 当系统返回到原来的CON组fi guration但初始条件是从平衡不同。

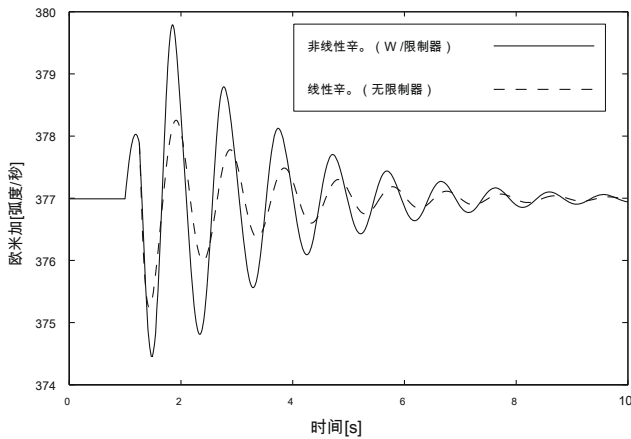


图5。在非非线性模型限制器 - 线性化的 ( 虚线 ) 的响应和非线性 ( 实线 ) 的模型的比较。

通过比较由前面的分析 图 4和5 显示, 在模拟条件下, 线性化模型提供了非线性动力学的一个很好的近似, 当限制器被忽视, 但是当它们被认为是显著的不准确和力度, 从而引导他们沿着系统轨迹被激活。由于这一事实, 它变得清晰, 线性模型的有效性被限制在限是不活跃的区域。

然而, 假设模拟的扰动很可能在系统中出现。如果我们接受上述限制, 我们别无选择, 但为了准确地研究系统行为进行非线性模拟。在另一方面, 假设我们执行线性模型的模拟, 以限幅为在该仿真模型的唯一非线性元件。如图6 呈现这样的模拟, 在相同条件下, 其中 图 4和5 获得, 并且完全非线性模拟结果与来自线性化系统的仿真的那些进行比较, 两者取限制器考虑。虚线是几乎面目全非, 这表明, 对模拟的条件下, 用限制器的linearizedmodel是完全非线性一个良好的近似。这也是Rmed指其他几个工作条件和扰动CON网络连接, 并导致我们可能会使用与限制器的线性模型来研究非线性一个的行为, 即使在限幅器活跃的地区一些地方的想法。

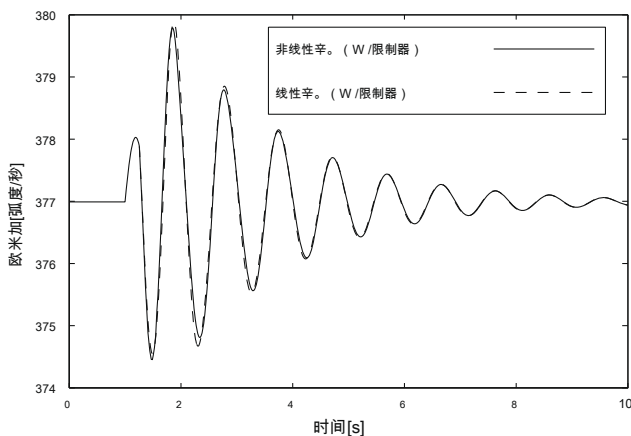


图6。限制器在两个模型 - 线性化的 ( 虚线 ) 的响应和非线性 ( 实线 ) 的模型的比较。

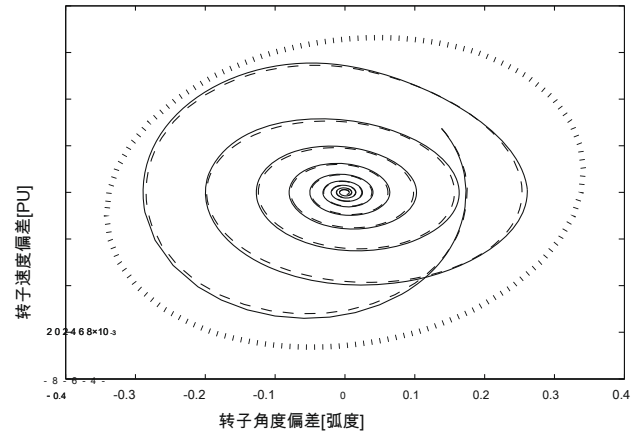


图7。吸引区域的估计值 ( 粗虚线 ) 和线性化的 ( 虚线 ) 的轨迹和非线性 ( 实线 ) 的模型, 在两个横轴限制器 - d d 与 d X 平面。

当然, 我们不应该期待这种方法提供了良好的效果作为系统的工作点漂移任意远离平衡条件的瞬态期间。如果操作条件显著地远离平衡, 即用限制器在丢弃所述线性化模型其他非线性将在近似引入显著的误差。另一个问题是, 所述线性化模型的与限制器的响应可以不与系统的线性状态空间相关联的本征值来描述。因此, 我们选择的运行条件和突发事件列表 ( 这是通常可在系统设置程序 ), 我们想检查是否与线性化模型可以提供关于一个非线性的任何信息。

在上一节中提出的算法是特别适合这种VERI网络阳离子, 对于稳定的性能。要应用此算法, 我们创建了包含导致为25%或滴在无限总线电压引发的扰动一意外事件列表 V1。持续, 分别, 64, 128, 256或512毫秒。这些周期后, 故障被清除, 并且系统返回到其原始CON组fi guration, 但故障后系统的初始条件是从平衡情况不同, 并导致系统的动态要么开始内或穿越区域, 其中所述限制器被激活。所提及的变体在组合 V1和故障持续时间总共8种不同的初始操作条件下产生的。

使用这些操作条件和应用在节介绍的算法 3, 有可能到Fi找到一个 P 矩阵<sup>2</sup>使得 ( P, 1) 是用于该系统的吸引区域的估计 ( 11) 考虑 ( 13) 和 ( 14), 这与限制器的线性化模型。由于我们已经观察到 如图6 与限制器线性模型的响应非线性系统电源systemmodel的反应 ( 加的PSS ) 的匹配良好, 我们可以考虑 ( P, 1) 作为此非线性系统的吸引区域的估计。

确实, 图 7和8 分别示出, 该组的投影 ( P, 1) 在 d d 与 d X 平面和在 d E0q与 d E0p

平面在状态空间 ( 这些凸部是通过在两个网络连接gures粗虚线表示 )。在这些网络连接gures所示的仿真的条件是在所呈现的模拟的相同的条件 图 4和5。然而, 就表明这个

<sup>2</sup> 该SeDuMi [15] 和YALMIP [16] 包是用来实现节提出的算法 3。

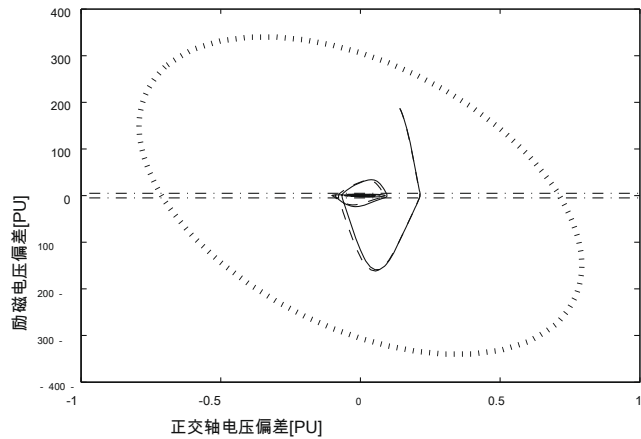


图8. 吸引区域的估计值 (粗虚线) 和线性化的 (虚线) 的轨迹和非线性 (实线) 的模型, 在两个模型限制器 -  $dE_{ro-q}$  和  $dE_{ro-p}$  飞机, 其中包括  $dE_{ro}$  限制器 (点划线水平线)。

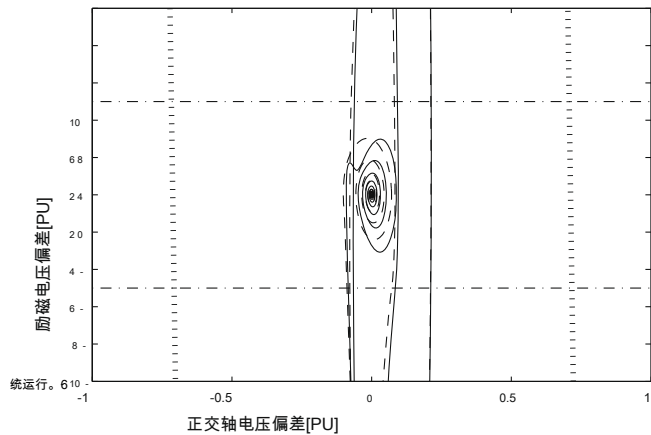


图9. 马尼科幻ED视图 (以原点为中心) 沿  $dE_{ro}$  轴 图8。

吸引区域的估计相对于初始条件的差异健壮, 故障持续时间为MODI音响编到200毫秒。

在 图8 中, 点划线的直线DE科幻NE的前沿  
其中AVR限制器不活跃的区域。从这张图中, 我们可以看到, 所获得的估计的吸引力面积比在限制器不活跃的区域大得多。<sup>3</sup>

因此, 就稳定性而言, 就有了保障, 对于模拟条件下, 该系统将是稳定的前提是它的轨迹保持在设定范围  
内 (P, q)。转变点的是图6, 我们获得图9, 第一个

表明, 用限制器线性化系统 (由虚线细线再次表示) 的动力学是非线性系统动力学的良好近似 (由实细线表示)。这也是骗子网络Rmed指在 图7。

现在, 证明了该方法的适用性多机系统中, 一系列新的试验在4 - 发电机系统, 这对小信号稳定性研究知名的基准测试系统和其完整的集显进行

数据可以从获得 [2]。此系统的单线图中呈现 图10。发电机3在无限总线建模为一个, 而在所有其他3个发电机为控制器输出的限制再次选择作为  $dE_{ro-q} = dE_{ro-p} = 5$  和  $dV_{小号} = dV_{小号} = 0.1$  PU,  $I = 1$ ,  $\dots$ , 3。对于算法到此4 - 发电机系统的应用程序的意外事件列表是基于跳闸, 在  $T = 200$  秒, 在通过总线8连接的总线7和9行中的电路brakers的, 随后的线的重合闸, 在  $T = R$ 。

其恢复系统的原始CONfi guration。在该第二系列的测试中, 通过的变化而产生10个不同的初始条件  $T$  从10至100毫秒, 在10秒的步骤。

为了比较由非线性和线性仿真提供的结果, 既考虑到限幅器, 在前面的段落中提到的相同的应变施加, 此时用

$T_R = 85$  毫秒。图11 示出了发电机2的非线性和线性模拟两者的转子速度的响应, 取限制器考虑在这两种情况下。它是不清楚 图11 该linearizedmodel与限制器的模拟可以提供非线性模型的到同一应急响应的良好近似。

图12 示出了抽取区域的与限制器线性化模型的估计 (粗虚线椭圆体), 并且该系统的非线性响应应该估计 (实线) 内作图。其中限制器被激活的区域也被示出在 图12

(点划线水平线)。因此能够看出, 非线性系统的响应实际击中瞬态期间的AVR输出限制, 所以相应的应急将不被认为是在通常意义上的小扰动, 但它

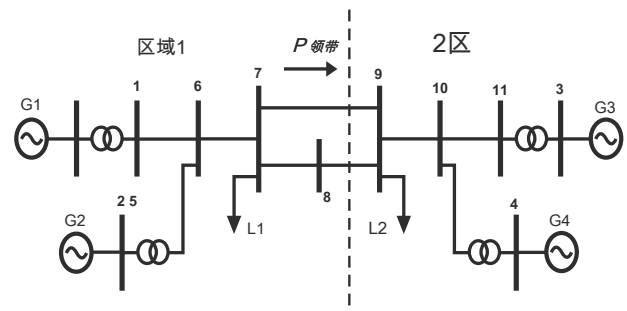


图10. 第二测试系统的单线图。

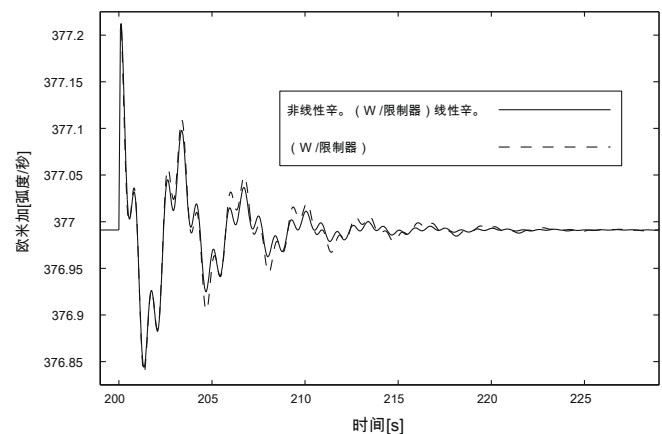


图11. 在将线性化 (虚线) 发电机2的转子速度的响应和非线性 (实线) 模型之间比较 -  $T_R = 85$  毫秒和限制在两个模型。

<sup>3</sup>我们必须指出的是, 由于AVR输出限制由饱和和限制器 (这个假设也是在做给 [2]), 在其中, 所述系统, 其中所述限制



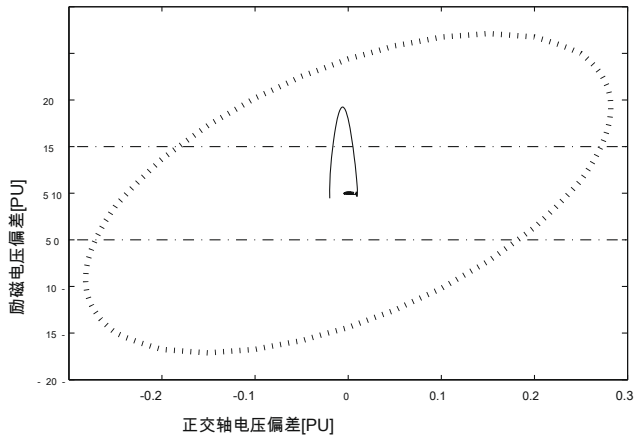


图12. 吸引区域 ( 粗虚线 )，并用限制器非线性 ( 实线 ) 模型的轨迹估计 -  $d\hat{E}_{0q}$  与  $d\hat{E}_{0m}$  飞机，其中包括  $d\hat{E}_{0m}$

限制器 ( 点划线水平线 )。

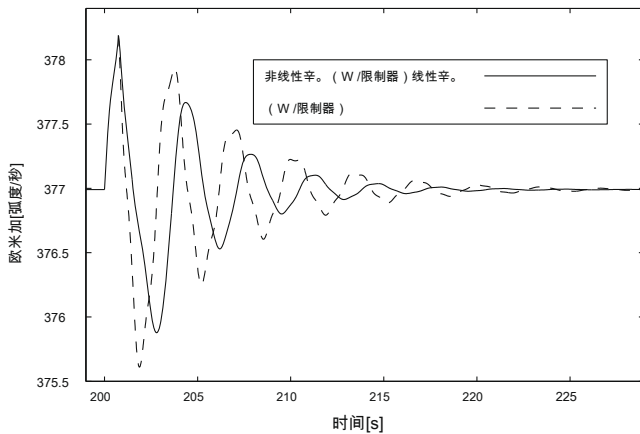


图13. 在线性化 ( 虚线 ) 发电机2的转子速度的响应和非线性 ( 实线 ) 模型之间比较 -  $\hat{T}_R = 750$  毫秒和限制在两个模型。

提出了系统的稳定性构成威胁，因为它是不清楚 图 图11和12 这种反应是稳定的。

为了完成分析，图13 示出了发电机2用于绘制先前的两个网络连接gures相同类型的偶然性的转子速度的反应，但此时用  $\hat{T}_R = 750$  毫秒。用于与限制器线性化模型的模拟的初始条件是现在它的吸引力区域所计算的估计值外，它是从清晰 图13 这个线性模拟不能精确表示非线性模型的轨迹，即使限制器已经考虑在内。因此，

图13 提供的证据多一个片，通过在本文提出的算法给定的吸引力区域的估计可以用于在电力系统大，小扰动之间进行区分。

## 5. 结论

在本文中，我们调查使用线性化的电力系统模型 ( 同时包括AVR和PSS输出限制器 ) 来评价稳定性的可能性，并估计该系统的吸引力区域在一个特定的操作条件。与限制器和完全非线性模型的线性化模型的响应之间的几个比较中进行，结果表明，所分析的工作条件，这的确是可能的

通过用包含限制器的线性化模型准确地表示所述非线性模型的动态特性。

提出估计线性systemwith限制器的吸引区域的算法。这种估计可以解网络连接宁对发电机安全运行的区域是有用的，比从考虑所产生的那些线性模型只是在该地区有效，其中限制器积极性不那么严格的要求。

吸引区域的这一估计提供了一个很好的和较不严格的标准为在电力系统的大和小的扰动之间进行区分，而不是其中指出，AVR和PSS输出限制器不能在过渡期用于应急是要达到的一个视为一个小的扰动。此外，通过用限幅器的线性化模型表示与准确性的非线性系统动力学的可能性也可能有用，因为较少耗时模拟可以使用具有限制器此线性化模型时被执行。这个话题，但是，需要更仔细的调查，这是这项工作的未来发展方向之一。

本研究的其他预测的发展包括其他非线性的可能影响由线性化模型给出的描述的精度 ( 如机器饱和，例如 ) 进行评估，并通过这种方法来给出的吸引面积估计的稳健性的评估变化在电力系统的操作点。

承认

这项工作是由Fundação日安帕罗aPesquisa做斯卡德圣保罗，格兰特在任何支持。2005 / 02542-9。

参考

- [1] DeMello FP, 协和C. 的同步机稳定性的概念  
受励磁控制。IEEE反式电源应用SYST 1969; PAS-88 ( 4 )。[2] Kundur P. 电力系统的稳定性和控制。纽约：麦格劳 - 希尔; 1994。[3] Yadaiah N, 多机电力系统的文卡塔玛纳N. 线性化：  
建模与控制 - 调查。 谕释J ELECTR电源的EnerG SYST  
2007; 29 : 297-311。
- [4] 拉莫斯RA, Martins的ACP, Bretas NG. 对于设计的改进方法  
功率 系统阻尼 控制器。 IEEE跨 功率 SYST  
2005; 20 ( 4 ) : 1938至1945年。
- [5] 拉莫斯RA, 阿尔贝托LFC, Bretas NG. 分散输出反馈控制器  
设计用于机电振荡的阻尼。谕释J ELECTR电源的EnerG SYST 2004; 26 : 207-19。
- [6] 平H, 刻纹W, 赤痛T, 的改进的僵B. 研究  
通过使用单个神经元模型的概率PSS。谕释J ELECTR电源的EnerG 2007 SYST; 29 : 217-21。
- 关于稳定性方面和DE音响nitions, 解音响nition和[7] IEEE / CIGRE联合工作队  
电力系统稳定性的CLASSI网路阳离子。 IEEE跨功率SYST  
2004; 19 ( 2 ) : 1387至1401年。
- [8] 辛H, 甘DD, 仲TS, 邱J. 一种用于评估的性能的方法  
PSS用饱和输入。ELECTR功率SYST RES 2007; 77 : 1284年至1291年。[9] 辛H, 甘D, 仲TS, 饱和度非线性/干扰  
邱J. 影响  
对电力系统的稳定性：一种分析方法。ELECTR功率SYST RES 2008; 78 : 849-60。
- [10] 安德森PM, 福阿德AA. 电力系统的控制和稳定。皮斯卡塔韦：IEEE  
按; 1994年。
- [11] EV拉森, 斯旺DA. 应用电力系统稳定器，第I, II和III。IEEE  
反式电源应用SYST 1981; PAS-100 ( 6 )。
- [12] 派姆C, Tarbouriech S, 达席尔瓦JR JMG, Castelan EB. 新条件  
确定与饱和驱动线性系统稳定性的区域。在：所述XIV巴西自动控制会议学报，纳塔尔，巴西;  
2002年第2433-37。
- [13] 达席尔瓦JR JMG, Tarbouriech S, 加西亚G. 本地线性系统的稳定化  
下的振幅和速率饱和致动器。IEEE反式控制奥波2003; 48 ( 5 ) : 842-7。
- [14] 奥利维拉MC, 斯科顿尔RE. 稳定性测试约束线性系统。在：  
Moheimani SOR, 编辑。展望鲁棒控制。讲义在控制和信息科学。施普林格出版社; 2001年第 241-57。[15] 斯特姆  
JF. 使用SeDuMi 1.02, 在MATLAB的优化  
对称锥体; 2001年可供自： <http://sedumi.mcmaster.ca/>。
- [16] LöfbergJ. " YALMIP : 一种用于在MATLAB建模和优化工具箱"。在：  
在CACSD会议，台北，台湾的法律程序; 2004年可供自：  
<http://control.ee.ethz.ch/~jloef/yalmip.php>。