

基于 PSSE 的发电机饱和对低频振荡的影响

帅丽¹, 马进¹, 肖友强²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 云南电力试验研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 在电力系统分析过程中, 通常采用近似的方式来计及发电机饱和的影响, 一般通过额定电压和 1.2 倍的额定电压处的饱和系数这两个参数以一定的近似形式来计及饱和的影响。为了研究发电机饱和对低频振荡的影响, 基于 PSSE 软件的发电机模型和参数的具体定义, 通过对两区域四机系统进行小扰动稳定分析, 并考虑不同的发电机饱和形式以及同一饱和形式下不同饱和系数情况下系统低频振荡的频率和阻尼的变化情况。研究表明, 忽略发电机饱和的影响和计及发电机饱和的影响将会得到不同的结论, 另外, 在使用 PSSE 过程中, 考虑发电机饱和时使用不同的饱和形式得到的结论也不尽相同, 同时, 即使使用同一饱和形式, 不同的饱和系数参数对低频振荡的频率和阻尼都有一定程度的影响。

关键词: 发电机饱和; 饱和系数; 低频振荡; 振荡频率; 阻尼

The impact of generators saturation in low-frequency oscillations based on PSSE

SHUAI Li¹, MA Jin¹, XIAO You-qiang²

(1. Institute of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Yunnan Electric Power Test and Research Institute, Kunming 650217, China)

Abstract: In power system analysis, the approximate way is used to take into account the impact of generators saturation, generally adopts these two saturation coefficient of the rated voltage and rated voltage of 1.2 times. In order to study the impact of generators saturation in low-frequency oscillations, this paper analyzes the change of oscillation frequency and oscillation damping of low frequency oscillation in the case of considering different forms of generating saturation, as well as different saturated saturation coefficient while the same generating saturation forms through small signal stability analysis of the two regions and four machine system which is based on the model and parameters defined by PSSE. Studies have shown that there will be a different conclusion between considering and ignoring the effects of generators saturation. In the use of PSSE process, the conclusions may differ from each other when using a different generator saturated form. Even if using the same form saturation, the different parameters of saturation coefficient will affect the frequency and damping of the low-frequency oscillations to a certain extent.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50707009).

Key words: generators saturation; saturation coefficient; low-frequency oscillation; oscillation frequency; damping

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0012-04

0 引言

随着电网规模的不断增大, 我国电网出现了远距离大容量功率传输现象, 远距离输电给电力系统带来诸多稳定方面的问题, 其中低频振荡问题一直是电力系统稳定问题的重要问题。低频振荡的振荡

周期长, 波及范围广, 给电力系统安全稳定运行带来很大的危害。近年来高增益快速励磁系统在电力系统的广泛应用, 恶化了系统振荡阻尼, 增加了系统发生低频振荡的几率, 使得低频振荡问题日益突出, 引起了电力研究部门和电力运行部门的广泛关注。

1 问题的提出

电力系统是一个发电、输电、用电的统一体, 自低频振荡倍受关注以来, 已经有很多文献对低频振荡的影响因素方面进行研究。关于发电侧的发电

基金项目: 国家自然科学基金项目(50707009); 高等学校博士学科点专项科研基金(20070079014); 北京市科技新星计划; 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室开放项目(SKLD09KM04); “111”引智计划(B08013)

机模型和参数及励磁系统、输电系统的网架结构、用电侧的负荷特性对低频振荡的影响,已有相当一部分文献进行了研究并已取得很多有意义的结论。而对于发电机饱和对低频振荡的研究关注得比较少,于是人们在进行电力系统研究过程中往往用一个近似的方程形式来计及饱和的影响。通常用额定电压和 1.2 倍的额定电压处的饱和系数(分别为 S1.0, S1.2)来近似地定义发电机的饱和,而关于这两点的饱和系数一般都是取一个范围内的典型值。在低频振荡研究方面,发电机考不考虑饱和、考虑饱和的影响时这样的近似以及 S1.0 和 S1.2 的值的近似选取对低频振荡的影响怎样?本文将基于 PSSE 的发电机模型和参数定义,针对以上问题对两区域四机系统的低频振荡情况进行分析并得到相应的结论。

2 电力系统小扰动稳定分析方法

电力系统的动态行为可以用一组一阶线性常微分方程式描述:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (2)$$

式(1)为描述电力系统动态元件的状态方程,式(2)为描述电力系统的代数方程。其中: \mathbf{x} 为状态变量向量; \mathbf{y} 为系统的代数变量; \mathbf{u} 指的是输入变量。不同的动态元件状态变量不同,本文参照的是 PSSE 里的模型定义的状态变量,状态方程也是根据 PSS 动态元件建立的状态方程,代数方程主要为电力系统的电压、电流方程。具体见 PSSE 相关介绍。限于篇幅问题这里不具体介绍。

对于小扰动稳定分析,可将系统在运行点附近进行线性化后得到的线性方程式来进行分析。若以 \mathbf{x}_0 、 \mathbf{y}_0 、 \mathbf{u}_0 分别表示初始状态变量、代数变量和输入变量。系统处于平衡运行点时,各电气量都是常量,所以有

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) = \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) \quad (4)$$

当系统受到小扰动时

$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x}$, $\mathbf{y} = \mathbf{y}_0 + \Delta\mathbf{y}$, $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}$ 于是,

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{d(\mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x})}{dt} =$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \Delta\mathbf{x} + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{\mathbf{y}=\mathbf{y}_0} \Delta\mathbf{y} + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_0} \Delta\mathbf{u}$$

(5)

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \Delta\mathbf{x} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right|_{\mathbf{y}=\mathbf{y}_0} \Delta\mathbf{y} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_0} \Delta\mathbf{u} \quad (6)$$

根据式(4)和式(6)

$$\Delta\mathbf{y} = \frac{\partial \mathbf{g}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right) \Delta\mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{g}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right) \Delta\mathbf{u} \quad (7)$$

结合式(3)、(5)和(7),可得:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u} \quad (8)$$

$$\Delta\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta\mathbf{u} \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \right) \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right) \right]$$

$$\mathbf{B} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \right) \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right) \right] \quad (10)$$

$$\mathbf{C} = \left(\frac{\partial \mathbf{g}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \right) \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right)$$

$$\mathbf{D} = \left(\frac{\partial \mathbf{g}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \right) \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} \right)$$

本文就是根据 PSSE 相关模型的框图写出式(1)和式(2),然后形成式(8)、式(9)中状态变量、代数变量和输入变量的系数矩阵,进而形成式(10)中的 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 矩阵进行相关分析。

3 PSSE 软件中发电机模型两种不同的饱和形式

当不考虑发电机饱和时,发电机定子电势和发电机励磁电压成正比,而实际上,并不是励磁电压越大,定子电势越大,当励磁电压增大到一定程度时,定子电势与励磁电压不再成线性关系,出现饱和现象。在电力系统研究中,通常用饱和系数 S 来计及发电机的饱和,饱和系数 S 的定义将通过图 1

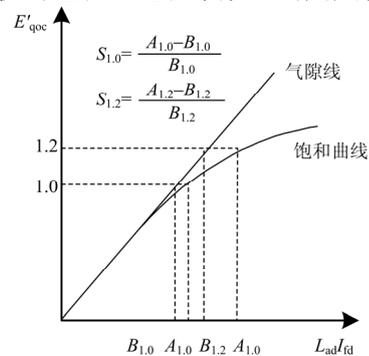


图 1 发电机饱和系数 S 的定义

Fig.1 The definition of saturation coefficient S of generator

进一步说明, 而饱和系数 S 的计算一般通过 $S_{1.0}$ 和 $S_{1.2}$ 来计算, 其中: $S_{1.0}$ 表示发电机定子电势为额定值时的饱和系数; $S_{1.2}$ 为发电机定子电势为 1.2 倍额定值时的饱和系数。

图 1 中气隙线为不考虑发电机饱和时定子电势与励磁电压的关系曲线, 饱和曲线为考虑饱和时定子电势与励磁电压的关系曲线, $S_{1.0} = \frac{A_{1.0} - B_{1.0}}{B_{1.0}}$,

$S_{1.2} = \frac{A_{1.2} - B_{1.2}}{B_{1.2}}$, 其中: $A_{1.0}$, $A_{1.2}$ 分别为计及发

电机饱和时饱和曲线上定子电势为额定值和 1.2 倍额定值时对应的励磁电压; $B_{1.0}$, $B_{1.2}$ 分别为不计及发电机饱和时气隙线上定子电势为额定值和 1.2 倍额定值时对应的励磁电压。在电力系统分析过程中, $S_{1.0}$ 和 $S_{1.2}$ 这两个参数是已知的。

PSSE 中发电机六阶模型饱和有两种表达方式, 分别是二次型和指数型, 当用二次型表示发电机饱和时, 饱和系数计算公式为: $S = B(E - A)^2 / E$, 其中 S 的定义类似于上述 $S_{1.0}$ 和 $S_{1.2}$ 的定义, 而 A 、 B 是根据已知的 $S_{1.0}$ 和 $S_{1.2}$ 计算出来的系数, E 为图 1 中的纵坐标, 在发电机六阶模型中, E 为发电机次暂态电势 E'' 。 $E'' = \sqrt{E_d''^2 + E_q''^2}$, E_d'' 为 d 轴次暂态电势, E_q'' 为 q 轴次暂态电势, 所以, 当发电机饱和用二次型时, 饱和系数 $S = \frac{B(E'' - A)}{E''}$ 。

当用指数型表示发电机饱和时, 饱和系数计算公式为: $S = S_{1.0} E^X$, $X = [\ln(S_{1.2} / S_{1.0})] / \ln(1.2)$, E 的意义与二次型中的 E 完全一样。

基于以上的饱和, PSSE 中六阶模型与饱和有关的两个状态方程

$$E_q' = \frac{1}{T_{d0}'} [E_{fd} - a_1 E_q' + a_3 \psi_D - a_5 i_d - S E_q''] \quad (11)$$

$$E_d' = \frac{1}{T_{q0}'} [a_2 E_d' + a_4 \psi_Q + a_6 i_q - S E_q'' \frac{X_q - X_1}{X_d - X_1}] \quad (12)$$

其中:

$$a_1 = 1 + \frac{(X_d' - X_d'')(X_d - X_d')}{(X_d' - X_1)^2} \quad (13)$$

$$a_2 = -1 - \frac{(X_q' - X_q'')(X_q - X_q')}{(X_q' - X_1)^2} \quad (14)$$

$$a_3 = \frac{(X_d' - X_d'')(X_d - X_d')}{(X_d' - X_1)^2} \quad (15)$$

$$a_4 = \frac{(X_q' - X_q'')(X_q - X_q')}{(X_q' - X_1)^2} \quad (16)$$

$$a_5 = \frac{(X_d - X_d')(X_d'' - X_1)}{X_d' - X_1} \quad (17)$$

$$a_6 = \frac{(X_q - X_q')(X_q'' - X_1)}{X_q' - X_1} \quad (18)$$

发电机各参数见表 1。

表 1 发电机各参数说明

Tab.1 Description of the parameters of generator

符号	E_{fd}	T_{d0}'	T_{q0}'	ψ_D	ψ_Q	i_d	i_q
说明	励磁电压	d 轴开路暂态时间常数	q 轴开路暂态时间常数	阻尼 D 绕组磁链	阻尼 Q 绕组磁链	定子 d 轴电流	定子 q 轴电流
符号	X_1	X_d	X_q	X_d'	X_q'	X_d''	X_q''
说明	定子漏抗	d 轴电抗	q 轴电抗	d 轴暂态电抗	q 轴暂态电抗	d 轴次暂态电抗	q 轴次暂态电抗

4 饱和对低频振荡的影响

4.1 饱和形式对低频振荡的影响

本文研究算例为两区域四机系统, 系统由两个相似的区域以弱连接的方式组成, 每台机组额定容量为 900 MVA, 区域 1 的有功负荷为 976 MW, 无功负荷为 100 Mvar, 区域 2 的有功负荷为 1 737 MW, 无功负荷为 100 Mvar。

其网架结构如图 2。

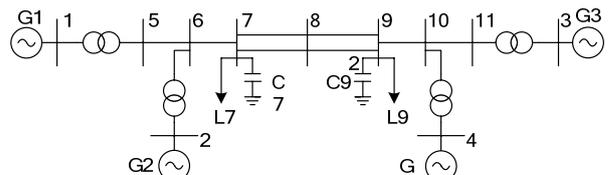


图 2 两区域四机系统网架图

Fig.2 The two regional four-machine system network diagram

通过基于 PSSE 发电机传递函数及电力系统各电气量之间的关系方程的小扰动稳定分析, 得到饱和对低频振荡影响的结论, 具体见表 2。

从计算的结果看出, 对于区域间振荡模式, 考虑饱和后振荡频率和阻尼比都有所下降; 对于本地振荡模式, 考虑饱和后振荡频率下降, 阻尼有所增加。对于区域间振荡和本地振荡, 使用平方饱和形式得到的振荡频率和阻尼都比采用指数饱和形式时略大。

表 2 不同饱和形式的结果比较
Tab.2 Results when saturation forms are different

	区域间		区域 1		区域 2	
	振荡模式		本地振荡模式		本地振荡模式	
	频率	阻尼比	频率	阻尼比	频率	阻尼比
无饱和	0.545 2	0.035 8	1.084 8	0.085 1	1.115 5	0.084 1
指数饱和	0.544 6	0.035	1.079	0.088 8	1.11	0.087 5
平方饱和	0.545 1	0.035 5	1.081	0.090 5	1.112 0	0.089 2

4.2 发电机饱和系数 $S_{1.2}$ 对低频振荡的影响 ($S_{1.0}=0.0392$)

如表 3, 通过分析, 区域间振荡模式的振荡频率随着 $S_{1.2}$ 的增大而减小, 振荡阻尼比随 $S_{1.2}$ 增大而减小。本地振荡的振荡频率随 $S_{1.2}$ 的增大而减小, 振荡阻尼比随 $S_{1.2}$ 的增大而增大。

表 3 $S_{1.2}$ 不同时的结果比较

Tab.3 Results when saturation coefficient $S_{1.2}$ is different

发电机 饱和系数	区域间		区域 1		区域 2	
	振荡模式		本地振荡模式		本地振荡模式	
$S(1.2)$	频率↓	阻尼比↓	频率↓	阻尼比↑	频率↓	阻尼比↑
0.227	0.545 09	0.035 52	1.078 8	0.090 5	1.109 6	0.089 2
0.3	0.544 98	0.035 44	1.077 4	0.091 6	1.108 3	0.090 2
0.35	0.544 94	0.035 39	1.076 6	0.092 3	1.107 5	0.090 9
0.4	0.544 83	0.035 36	1.075 7	0.093 0	1.106 7	0.091 6
0.45	0.544 70	0.035 37	1.074 9	0.093 7	1.105 9	0.092 2
0.5	0.544 69	0.035 29	1.074 1	0.094 3	1.105 1	0.092 8

4.3 发电机饱和系数 $S_{1.0}$ 对低频振荡的影响 ($S_{1.2}=0.227$)

如表 4, 通过分析, 区域间振荡模式的振荡频率随着 $S_{1.0}$ 的增大而减小, 振荡阻尼比随 $S_{1.0}$ 增大而增大。本地振荡的振荡频率随 $S_{1.0}$ 的增大而减小, 振荡阻尼比随 $S_{1.0}$ 的增大而增大。

表 4 $S_{1.0}$ 不同时的结果比较

Tab.4 Results when saturation coefficient $S_{1.0}$ is different

发电机 饱和系数	区域间		区域 1		区域 2	
	振荡模式		本地振荡模式		本地振荡模式	
$S(1.0)$	频率↓	阻尼比↑	频率↓	阻尼比↑	频率↓	阻尼比↑
0.039 2	0.545 09	0.035 52	1.078 8	0.090 5	1.109 6	0.089 2
0.05	0.545 06	0.035 59	1.078 3	0.091 0	1.109 1	0.089 7
0.09	0.545 03	0.035 67	1.077 1	0.092 4	1.107 7	0.091 2
0.13	0.545 02	0.035 79	1.075 9	0.093 6	1.106 5	0.092 4
0.17	0.544 95	0.035 91	1.074 9	0.094 7	1.105 4	0.093 5
0.2	0.544 91	0.035 97	1.074 2	0.095 4	1.104 6	0.094 3

5 结束语

通过对两区域四机系统低频振荡情况的分析,

得到以下结论:

(1) 在进行低频振荡分析过程中, 忽略饱和的影响和计及饱和的影响得到的结论是不一样的, 考虑饱和的影响后无论是对于本地振荡模式还是区域间振荡模式, 其振荡频率都有所下降, 而对于阻尼比的影响, 考虑饱和后区域间振荡模式阻尼比下降, 本地振荡阻尼比增加。

(2) 对于不同的饱和形式, 对低频振荡频率影响不是很明显, 但是对阻尼比有一定影响。平方饱和形式下低频振荡阻尼比指数饱和形式下的阻尼比要大。

(3) 对于通常所用来表示饱和的两个参数 $S_{1.0}$, $S_{1.2}$, 区域间振荡模式的振荡频率随着 $S_{1.0}$, $S_{1.2}$ 的增大而减小, 振荡阻尼比随 $S_{1.0}$ 增大而增大, 随 $S_{1.2}$ 增大而减小。本地振荡的振荡频率随 $S_{1.0}$, $S_{1.2}$ 的增大而减小, 振荡阻尼比随 $S_{1.0}$, $S_{1.2}$ 的增大而增大。

参考文献

[1] 肖友强, 杨顺昌. 考虑饱和的同步发电机数学模型[J]. 电工技术学报, 1999(4).
XIAO You-qiang, YANG Shun-chang. A Saturation Model of Synchronous Generators[J]. Journal of Electrotechnical, 1999(4).

[2] 徐英新, 王西田, 杨帆, 等. 同步发电机阻尼绕组和磁路饱和对低频振荡阻尼的影响[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 32-35, 39.
XU Ying-xin, WANG Xi-tian, YANG Fan, et al. The Impact of Synchronous Generator Damper Windings and Magnetic Circuit Saturation on Low Frequency Oscillation Damping[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 32-35, 39.

[3] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[4] 罗成, 程时杰, 江全元. 磁饱和对同步发电机自激影响的研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(10): 17-20.
LUO Cheng, CHENG Shi-jie, JIANG Quan-yuan. Research of the Impact of Magnetic Saturation on Self-excited Synchronous Generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(10): 17-20.

[5] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Dynamic Systems Theory and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-12-24

作者简介:

帅丽(1983-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统稳定方面的研究工作。E-mail: shuailiping@163.com