

NGH 次同步谐振阻尼方案的研究与结构改进

濮 岚

(扬州供电公司, 江苏扬州 225000)

摘 要: 由于我国能源与负荷分布不均匀, 有长距离高压送电的需要, 次同步谐振的研究变得越来越重要。本文首先对 NGH 次同步谐振阻尼抑制方案的原理进行分析, 论证了其基本理论的可行性, 并指出影响其推广应用的原因, 然后对原实验模型进行了改进, 提出了改进 NGH 结构——NGH-C 结构, 即在原先的电力电子结构中添加电容, 以提高抑制效果。NGH 方案属于被动抑制, 能够消减谐振分量, 且其原理结构简单, 易于工程实践, 但由于不能完全消除谐振, 所以建议作为次同步抑制的辅助方案。

关键词: 次同步谐振; 轴系振荡; NGH 方法; IEEE 第一基准模型; 结构改进电容

0 引言

我国能源与电力负荷的地理特点决定了大容量、远距离输电成为必然。串联补偿是提高远距离输电系统传输容量、改善系统稳定性的一种常用的有效方法^[1]。但是, 这一方法也会给电网带来一些不稳定因素, 其中之一就是会引起次同步谐振。当汽轮发电机轴系机械系统共振频率随单机容量的增大而降低到同步速以下时, 若和电力系统中串联补偿电感电容谐振或落在直流输电负阻尼区, 系统就会发生谐振^[2], 降低其机械寿命, 严重时甚至会使发电机轴扭断^[1]。对于这一问题, 国外已有多方面的研究, 并提出了很多解决方案与防止措施, 但国内还在原理性研究阶段, 抑制次同步谐振的问题亟待进一步深入研究^[3]。

1980年由美国电科院Narain G. Hingorani博士提出的NGH次同步谐振阻尼方法^[4]。该方法在南加州爱迪生电力公司的Lugo变电所中进行了现场工程应用, 效果令人满意^[6]。但是NGH的方法在次同步分量占整个电压比重较大时效果很不理想, 影响了其进一步推广应用。本文对NGH次同步谐振抑制阻尼方案进行了频谱方面的理论分析, 指出影响稳定的原因, 并就NGH的现有结构进行了改进, 提出了NGH-C的抑制系统结构, 来提高原方案的抑制效果。

1 研究对象

本文选用的是IEEE第一基准模型^[5]的改进模型, 原模型电气部分如图 1所示。

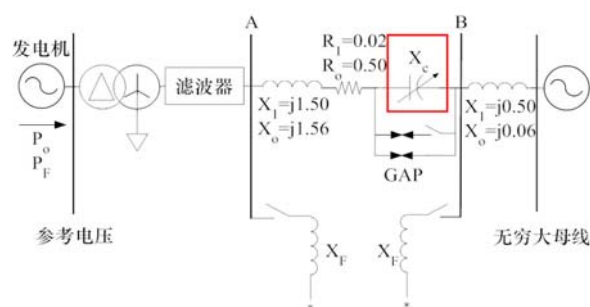


图 1 IEEE 第一基准模型电气部分

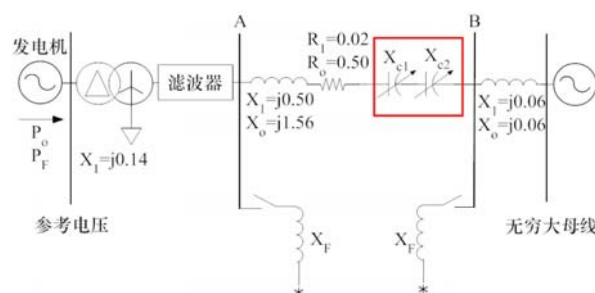


图 2 用于次同步振荡研究的网络

这里考虑到系统侧的等效电容在近主变侧不能完全忽略, 因此将图 1中的 X_c 等效为图 2中 X_{c1} 与 X_{c2} 串联, $X_{c1}=X_{c2}=2X_c$ 。认为 X_{c1} 为线路中的实际可控电容, X_{c2} 为线路中的系统侧等效电容, 不可控。两电容的等效值为原模型中的电容容值, 以此保证了该系统与原系统的电气属性相似。其他参数和释义可以参考文献[5]。

2 NGH 方案的基本假设与原理论证

NGH 次同步谐振阻尼方案的基本原理可以用图 3来说明。这里需要说明的是, 由于仿真软件和

仿真测试模型的限制,这里采用60Hz作为基频。

在60Hz基频系统中,如果在基频电压 V_n 上叠加一次同步分量 V_{ss} ,则会出现合成波形 V 的半个周波时间不等于正常60Hz半个周波的时间($(1/60)/2=8.33\text{ ms}$)的现象(如图3)。图3中 V_n -基频电压分量; V_{ss} -次同步分量; V -实际电压, $ab=bc=cd=de=8.33\text{ms}$; $ab'>8.33\text{ms}$; $b'c'<8.33\text{ms}$; $c'd'<8.33\text{ms}$; $d'e'>8.33\text{ms}$ ^[4]。

所以,基频(60Hz)与次同步频率信号叠加将产生一些不等于正常半周时间的半周波(8.33 ms)。相反地,如果没有次同步分量叠加现象,那么每一半周都应为8.33 ms。

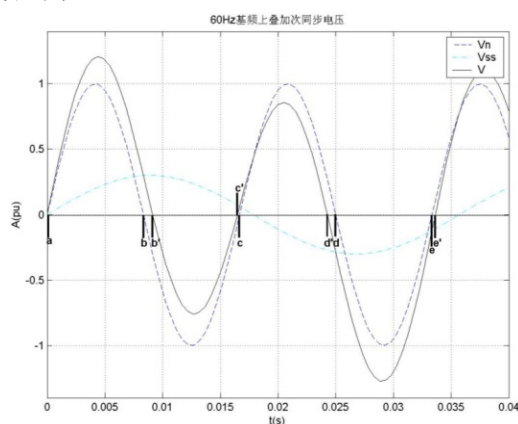


图3 带同步分量电压波形

若假定不平衡能量在串联补偿电容器和系统电抗之间交换产生了振荡,那么在电容电压的半个周波时间大于正常半个周波电压时强制对电容放电,来达到损耗谐振能量,有效地减小系统在60 Hz以外其它频率上的谐振的目的。此即NGH方案的基本理论假设。^[4]

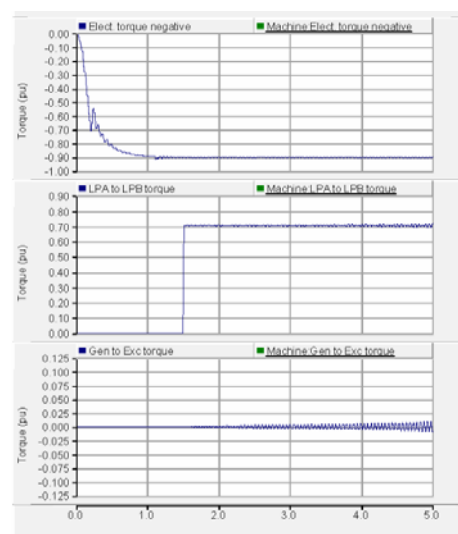
电气阻尼(上);大轴低压缸AB段间的机械振动(中);大轴发电机段和励磁间的机械振动(下)

图4为系统正常运行时的相关波形,从中可以看出电气阻尼恒定在一个数值为-0.9的负值上;大轴低压缸AB段间的机械振动近似为零,在0.7的数值上有轻微的振动;大轴发电机段和励磁间的机械振动也恒定在零值上,这代表系统大轴是稳定的。

电气阻尼(上);大轴低压缸AB段间的机械振动(中);大轴发电机段和励磁间的机械振动(下)

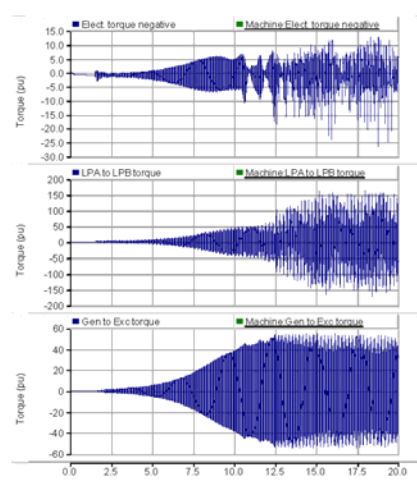
图5描述的是系统在图2中母线B处,1.5s时发生0.75s的三相接地短路,发生剧烈振动并失稳时的相关波形,从中可以看出电气阻尼值剧烈振荡,并出现了正值,并到达了10;大轴低压缸AB段间的机械振动及大轴发电机段和励磁间的机械振动值也

出现剧烈振荡,即系统大轴出现剧烈振荡。



电气阻尼(上);大轴低压缸AB段间的机械振动(中);大轴发电机段和励磁间的机械振动(下)

图4 正常情况下测试系统的各项参数



电气阻尼(上);大轴低压缸AB段间的机械振动(中);大轴发电机段和励磁间的机械振动(下)

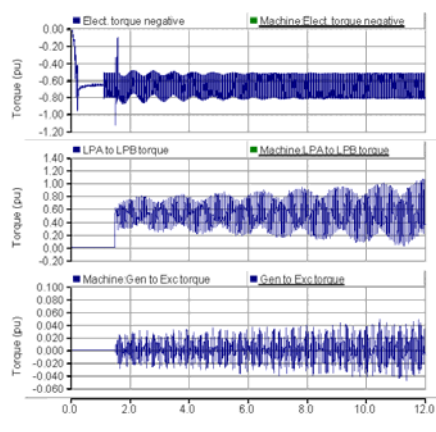
图5 无抑制措施,故障情况下测试系统的各项参数

系统在图2中母线B处,1.5s时发生0.75s的三相接地短路,在 X_{c1} 和 X_{c2} 上同时添加NGH抑制装置,采用文献[6]中所述的提前触发,该测试在新模型下是最理想的情况下,即系统侧电容也认为可控。

电气阻尼(上);大轴低压缸AB段间的机械振动(中);大轴发电机段和励磁间的机械振动(下)

图6描述的是当单机无穷大系统中所有的电容均受NGH方法控制时的次同步抑制效果图。从中可以看出,虽然电气阻尼值,大轴低压缸AB段间的机械振动及大轴发电机段和励磁间的机械振动并不能完全达到系统正常运行时的值,但与正常值相差并

不大。在经过足够长的测试时间后，电气阻尼在-0.5~-0.8之间波动并维持在负值；大轴低压缸AB段间的机械振动在1以内；大轴发电机段和励磁间的机械振动在 ± 0.02 之间。从测试结果可以看出，在系统中所有电容均可控的情况下，NGH方法对次同步谐振有较好的抑制效果，此状态下的系统在受到扰动之后可以恢复到正常状态。

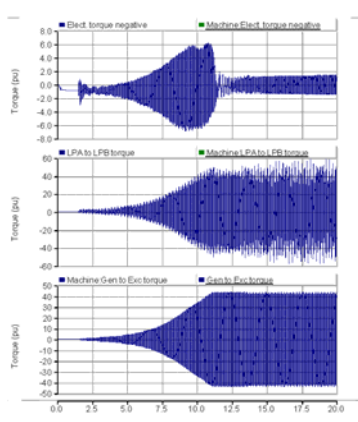


电气阻尼（上）；大轴低压缸 AB 段间的机械振动（中）；大轴发电机段和励磁间的机械振动（下）

图 6 NGH同时控制 X_{c1} 和 X_{c2} 时，故障情况下系统的各项参数

但这种情况实际上是不存在的，通常出现的是系统侧电容（图 2 中 X_{c2} ）不可控，在这种情况下，NGH方案的效果如电气阻尼（上）；大轴低压缸AB段间的机械振动（中）；大轴发电机段和励磁间的机械振动（下）

图7所示。从中可以看出电气阻尼值，大轴低压缸AB段间的机械振动及大轴发电机段和励磁间的机械振动值均发散严重，即系统大轴出现剧烈振荡。



电气阻尼（上）；大轴低压缸 AB 段间的机械振动（中）；大轴发电机段和励磁间的机械振动（下）

图 7 新模型时，故障情况下 NGH 方法抑制效果

综上，如果系统中所有电容均可控，那么NGH

方法可以很好地抑制次同步谐振，使得系统恢复到近似正常状态，但情况(3)中 X_{c1} 和 X_{c2} 均可控，即系统中所有电容均可控是不现实的。在实际中 X_{c2} ，即模型中设定的系统侧等效电容往往不可控。而在 X_{c2} 不可控时，NGH就不能够有效的抑制次同步谐振的发生，大轴的振荡会出现快速发散，造成危害。

3 NGH 方法的硬件改进

为了解决上述问题，在NGH提出的硬件基础上，本文做了结构上的改进。NGH原硬件系统如图 8 所示。新硬件系统如图 9 所示，添加电容 X_{cNGH} ，将其称为NGH-C结构，其硬件结构中添加的 X_{cNGH} 可以在装置接入系统产生作用时改变系统中电容的值，并且加速谐振能量的损耗，即减少图 3 中面积较大的部分，改变电气量中的振荡能量，从而改变机械量对应振荡频率的振荡幅值，使得系统免于发生大轴剧烈振动并尽快恢复到正常状态。本文把这一抑制系统结构称为NGH-C结构。

根据多次仿真实验发现， X_{cNGH} 的值较大时效果较好，但从性价比考虑， X_{cNGH} 的值两倍于其控制的串联电容时就可以达到比较好的效果。

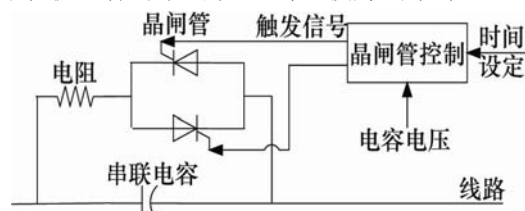


图 8 NGH-SSR 阻尼抑制方法的硬件结构

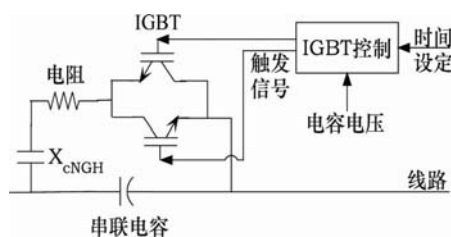


图 9 NGH-C 方法

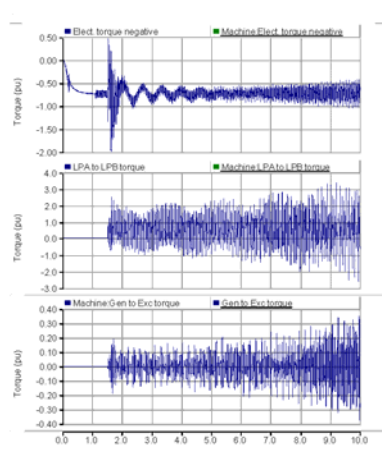
4 PSCAD 仿真实验

系统在图 2 中母线B处，1.5s时发生 0.75s的三相接地短路，在 X_{c1} 上添加NGH抑制装置，采用文献[6]中所述的提前触发；仿真结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出，NGH-C方法可以有效地控制大轴振动幅值的发散，达到抑制效果。从图 10 中可以看到电气阻尼值处于-0.5~-1 之间，并保持在负值的区域；大轴低压缸AB段间的机械振动大约在

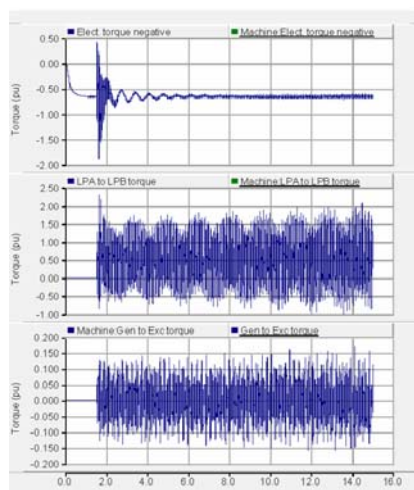
-2~3 之间,而大轴发电机段和励磁间的机械振动值在 ± 0.3 之间振动。与同等仿真条件下的NGH方法相比,NGH-C方法的抑制效果更好,并且从仿真结果看,NGH-C可以达到抑制次同步谐振,防止振荡放散的目的,但该方法不能完全消除次同步谐振。

图 11 可以看到电气阻尼值处于-0.5~-1 之间,并保持在负值的区域;大轴低压缸AB段间的机械振动大约在-1~2 之间,而大轴发电机段和励磁间的机械振动值在 ± 0.15 之间振动。从图 11与图 10 的仿真对比中可以看出, X_{cNGH} 值的大小关系到NGH-C方法的抑制效果,并且值较大时效果较好。



电气阻尼(上);大轴低压缸 AB 段间的机械振动(中);大轴
发电机段和励磁间的机械振动(下)

图 10 新模型时,故障情况下NGH-C方法抑制效果,
 X_{cNGH} 两倍于其控制的电容



电气阻尼(上);大轴低压缸 AB 段间的机械振动(中);大轴
发电机段和励磁间的机械振动(下)

图 11 新模型时,故障情况下NGH-C方法抑制效果, X_{cNGH}
略大于被控电容的两倍

综上,NGH方法及其改进方法NGH-C方法是被

动抑制的方法。在条件允许,系统中可控电容值占总容值比重较大时,NGH方法能够起到抑制次同步谐振的作用,并且效果良好;在条件比较苛刻,系统中可控电容值占总容值比重较小时,NGH方法几乎没有抑制效果,NGH-C方法能够起到在短时间内抑制系统快速发散的效果。 X_{cNGH} 值的大小在允许的情况下,值较大的效果较好,但根据仿真经验, X_{cNGH} 的值等于被控电容值的两倍即能够达到抑制的目的。因此NGH-C方法可以视系统可控电容情况作为系统次同步谐振抑制方法或作为一般抑制方法的辅助方法。

5 结论

通过以上仿真分析可以看到NGH-C方法在提高暂态转矩稳定和次同步谐振问题系统的稳定性是非常有效的,并且比NGH方法具有更好的工程实用价值。但是NGH-C方法只能被动抑制振动快速发散,但不能完全主动消除振动分量,在应用时还需要抑制方法的配合。

综上所述,由于NGH-C方法结构及控制方法简单,实现也较容易,因此在工程上,可作为抑制次同步谐振的辅助方案。

参考文献:

- [1] 兰泉妮,杨波,戴悦,等.次同步谐振分析和控制方法的综述[J].电气应用,2007,26(12):6-10.
- [2] 陈陈,杨煜.几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J].电网技术,1998,22(8):10-13.
- [3] 赵学强.NGH次同步谐振阻尼方案及其改进措施的研究[J].电力系统自动化,1999,23(12):29-34.
- [4] Hingorani, N.G., A New Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Torsional Oscillations and Transient Torque - Part I. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, Volume PAS-100, Issue 4, April 1981 Page(s):1852 - 1855
- [5] First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, Volume 96, Issue 5, Part 1, Sept. 1977 Page(s):1565 - 1572.
- [6] Hingorani, N. G.; Bhargava, B.; Garrigue, G. F.; Rodriguez, G. D. Prototype NGH Subsynchronous Resonance Damping Scheme Part I - Field Installation and Operating Experience. Power Systems, IEEE

Transactions on, Volume 2, Issue 4, Nov. 1987

Page(s):1034 – 1039.

作者简介:

濮 岚 (1986—), 女, 江苏扬州人, 电力系统次同步抑制,

E-mail: pu.lan@hotmail.com。