

基于水轮机内特性模型的水电机组振荡分析及控制

李凌华

(广东水电云南投资金平电力有限公司 云南省红河州 661500)

摘要:水电机组在实际运行的过程中经常会受到各种因素的影响出现超低频率振荡问题,对机组造成非常严重的影响,导致机组无法安全、稳定的运行。为了能够明确水电机组出现超低频率振荡问题的原因,首先结合实际情况设置了单机无穷大系统以及单机带负荷系统,在此基础上,对考虑励磁以及电力系统稳定器,或者是不考虑励磁以及电力系统稳定器这两种情况下两个系统的状态空间模型进行研究与分析,最终得出相应的振荡模式。之后利用振荡能量级理论知识来对系统在实际运行过程中主要的振动模式进行评估与分析,发现非无穷大系统与其他系统相比较,在运行的过程中出现超低频振荡问题的概率更大,并明确了造成这种问题的主要原因。除此之外,在单机带负荷系统的基础上,建立了相应的状态空间模型,利用状态空间模型,研究并分析励磁和 PSS 对系统运行时出现超低频振荡问题的影响程度,并明确了影响该系统的相关因素,最终发现通过对调速器进行合理的调整,合理的增长期比例或者是将积分环节增益比值适当增加能够有效的避免机组运行过程中出现超低频振荡问题。最后通过开展仿真实验工作对励磁、调速器等各种因素对超低频振荡问题产生的影响进行验证与分析,并利用单机无穷大系统对上述所提出的评估系统主导的振荡模式的方法是否正确进行验证。

Abstract: In the actual operation process of hydropower units, the problem of ultra-low frequency oscillation is often affected by various factors, which causes a very serious impact on the unit, resulting in the unit can not operate safely and stably. Hydropower unit in order to be able to clear the reason of low frequency oscillation problems, combined with the actual situation, set up the first single machine infinite system and loading system, on this basis, to consider excitation and power system stabilizer, or is not consider excitation and the power system stabilizer in both cases the two systems research and analysis of state space model, Finally, the corresponding oscillation mode is obtained. After that, the main vibration modes in the actual operation of the system are evaluated and analyzed by using the theoretical knowledge of oscillation energy level. It is found that the probability of ultra-low frequency oscillation in the operation of the non-infinite system is greater than that of other systems, and the main reasons for this problem are clarified. In addition, on the basis of the single machine loading system, the corresponding state space model was established, using the state space model, the research and analysis of excitation and PSS on the system running the influence degree of the low frequency oscillation problems, and identify the related factors affecting the system, finally found through the study of the reasonable adjustment of speed governor, A reasonable proportion of the growth period or an appropriate increase of the gain ratio of the integration link can effectively avoid the problem of ultra-low frequency oscillation during unit operation. Finally, the influence of excitation, governor and other factors on the ultra-low frequency oscillation is verified and analyzed by carrying out simulation experiments, and the single-machine infinite system is used to verify whether the method of evaluating the oscillation mode dominated by the system proposed above is correct.

关键词: 超低频振荡; 状态空间模型; 励磁环节; 参数

Key words: ultra-low frequency oscillation; state space model; excitation link; parameters

根据相关的统计可以发现,我国近年来出现超低频振荡问题逐年增加。最早在土耳其等国家所采用的电网中出现过超低频振荡问题,且在 2015 年左右我国云南地区在对预设的电网直流功率进行试验的过程中也出现了超低频振荡问题。

通常情况下,在对超低频振荡问题发生机制进行分析的过程中都会采用阻尼转矩系数法进行。利用波德图对单机带负荷系统在实际运行过程中出现超低频振荡问题时的振荡频率以及阻尼比进行全面的分析,并对阻尼转矩法在原动系统阻尼特性分析过程中的应用效果以及适用性进行验证。对超低频频段内机组中调速器的负阻尼进行分析,并通过阻尼转矩系数法的应用发现导致超低频率振荡问题产生的原因主要有两点,其一为机组调速器所设置的参数,其二为水轮机组的水锤效应。通过对超低频振荡相关文献资料的研究与分析,提出有

效的能够对超低频率振荡问题进行全面分析的系统等值法,以等值系统为基础,并利用阻尼转矩系数法对各个机组的阻尼转矩以及其原动机所设置的参数对产生超低频率振荡问题的影响进行研究与分析。对于等值单机系统而言,利用机组振荡频率等相关内容对水轮机组调速器阻尼进行全面的分析,最终提出合理的设置调速器的运行参数能够有效的防止超低频率振荡问题的出现。

当前在对超低频振荡发展机制以及对其产生影响的各种因素进行分析的过程中,研究人员还采用了其他方法。通过波德图以及劳斯判据的应用对水轮机组在实际运行过程中出现超低频振荡问题的原因进行研究与分析,同时还对调速器所设置的参数以及水锤效应对产生超低频振荡问题的影响程度进行研究与分析,但是根据实际情况来看,只有零阻尼的条件下才可以确保波德图分析的准确性,不存在误差。通过能量流分析法的应用

将汽轮机调速器以及水轮机调速器所设置的参数对出现超低频率振荡问题产生的影响进行对比与分析,但是该方法在实际应用的过程中并没有考虑励磁环节。因此结合实际情况将在考虑励磁的条件下,系统相应的状态空间模型推算出来,在此基础上发现调速器对超低频振荡问题的产生有着非常密切的关系,而励磁环节并不会对超低频振荡问题产生一定的影响,但是在对励磁环节对超低频振荡问题产生的影响进行分析时,并没有对 PSS 以及电压调节效应进行充分的考虑与分析,同时也并没有将考虑励磁和 PSS 以及不考虑励磁和 PSS 这两种情况下的振荡特性进行对比与分析。

本篇文章结合实际情况设置无穷大系统以及单机带负荷系统,在此基础上,将系统在考虑励以及 PSS 这一情况下的状态空间模型推导出来,并对其进行研究与分析得出相应的振荡模式;利用振荡能量级理论知识来对系统发现非无穷大系统与其他系统相比较在运行的过程中出现超低频振荡问题的概率更大;利用状态空间模型,将励磁调节以及 PSS 对无穷大系统以及单机带负荷系统的阻尼特性以及对超低频振荡问题产生的影响进行研究与分析,最终明确了造成超低频振荡问题的主要原因。

1 单机无穷大系统振荡特性

本篇文章主要以单机模型为依据对超低频振荡问题出现的主要场景以及产生该问题的主要影响因素进行研究与分析,单机模型主要为图 1 所示,根据相关的文献资料可以发现,电网在直流异步联网运行的过程中出现超低频振荡问题的概率更大,通常情况下直流系统都会利用定功率模式运行,在这种条件下受端系统为非无穷大系统。按照单机模型中的母线 2 是否与无穷大系统之间相互连接,可以将其划分为单机无穷大系统以及单机带负荷系统这两种类型,在此基础上对超低频振荡问题产生的原因以及影响因素进行研究与分析。

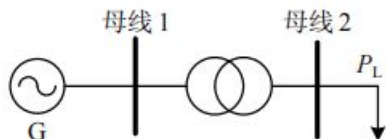


图 1 单机模型

1.1 调速器对系统振荡特性产生的影响

结合超低频振荡以及低频振荡这两种情况下振荡频率变化的规律以及变化范围可以了解到低频振荡特征的根本虚部绝对值具体在 1.3433~14.864 之间,而对于超低振荡来说,其根本虚部绝对值在 0.5984 之内,通过研究与分析可以发现,超低频振荡的能量级与低频振荡的能量级相比非常小,由此可以看出,单机无穷系统出现超低频振荡问题的概率比较小。依据状态空间模型发现系统振荡频率为 0.7683Hz,阻尼比为 0.1724,与采用 TLS-ESPRIT 算法而获得的数据一致,从而可以判定通过建立系统状态空间模型来对超低频率振荡问题进行相关研究是正确的。

机组调速器参数如果发生变化,则特征根也会随之发生一定的变化,具体来说就是机组调速器参数会对系统特征根造成一定的影响,为图 2 所示,如果 K_P 、 K_D

以及 T_i 在规定的范围内不断变化,那么与超低频振荡所对应的特征根就不会发生较大的变化,系统主导振荡模式特征根会出现较为明显的改变, K_P 、 K_D 以及 T_i 之间, K_P 如果发生改变并不会对特征根虚部造成影响,而 K_D 以及 T_i 出现变化则会对特征根虚部造成极大的影响,系统主要呈低频振荡模式,因此单机无穷大系统出现超低频振荡问题的概率非常低。

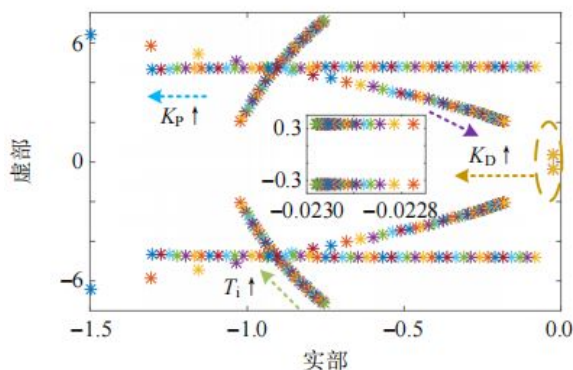


图 2 调速器参数变化对特征根产生的影响

1.2 参数对系统特征根轨迹产生的影响

调速器设置参数出现变化,则特征根轨迹也会随之发生改变,具体为下图所示,如果 K_D 以及 T_i 发生变化,那么机组调速器低频振荡模式相应的特征根也会随之发生较为明显的变化,而机组调速器相应的超低频振荡模式相应的特征根则不会发生较大的变化,同时在励磁调节的影响下所形成的振荡模式相应的特征根同样不会发生较大的变化。使机组调速器的参数进行调整并不会对励磁调节所形成的低频振荡模式相应的特征根造成影响,因此对于具备励磁调节的单机无穷大系统来说,其并不会受到机组调节器设置参数的影响而出现超低频振荡的问题。

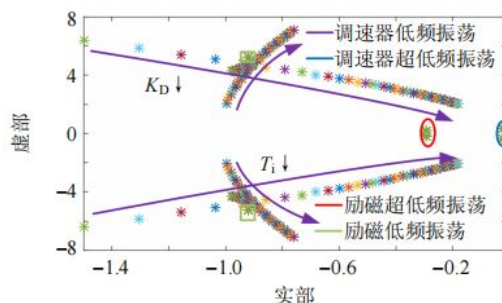


图 3 调速器参数变化时的特征根轨迹产生的影响

在励磁调节的作用下所形成的低频振荡是系统最为重要的振荡模式,若励磁参数能够始终在合理的范围内不断变化,那么低频振荡并不会变成超低频振荡模式,因此在对励磁进行充分考虑的单机无穷大系统中出现超低频振荡的概率非常小,励磁参数发生变化会对其特征根轨迹造成一定的影响。

2 单机带负荷系统振荡特性

2.1 调速器对系统超低频振荡产生的影响

根据图 1 可以发现,单机模型中的母线 2 如果与负荷之间相互连接,则为单机带负荷系统,首先该系统不

对励磁调节的情况下对超低频振荡产生的影响进行考虑与分析, 负荷系统模型采用恒阻抗模型, 通过 TLS-ESPRIT 算法的应用将转速曲线所得结果与小信号分析模型所得的结果之间进行对比与分析, 最终对建立状态空间模型是否正确进行验证, 为后续利用状态空间模型来分析产生超低频振荡问题的影响因素提供一定的帮助。

KD 以及 Ti 参数发生变化都会对特征根造成一定的影响, 使其随之发生变化。如果 KP 达到 KP_{max} 时, 则在 KP 不断增加的条件下, 阻尼比也会随之不断增加, 这时系统主要的振荡模式为超低频振荡; 如果 KP 达到 KP_{mode} 时, 则在 KP 不断增加的情况下, 阻尼比就会随之不断减小, 这时系统主要的振荡模式还是为超低频振荡; 如果 KP 与 K_{pst} 时那么系统的振荡模式为低频振荡, 系统丧失稳定性, 无法正常运行, 因此只有确保 KP 在规定的范围内不断增长, 才能够有效的避免超低频振荡问题的出现。如果 K_i 值比较小, 并在规定的范围内不断变化, 那么如果 KP 与 K_i 之间的比值不断增加, 会使得特征根虚部也随之不断增加, 系统阻尼比也会随之不断增加, 从而有效的避免超低频振荡问题的出现。

2.2 励磁环节对系统超低频振荡产生的影响

2.2.1 励磁环节小信号分析模型

考虑励磁环节以及不考虑励磁环节的情况下, 系统无论是振荡频率还是阻尼比都没有出现较大的变化, 由此可以看出, 励磁环节并不会对超低频振荡产生较大的影响。

2.2.2 励磁参数对超低频振荡产生的影响

励磁环节并不会对系统出现超低频振荡造成一定的影响, 主要原因是励磁系统所涉及到的各个环节都不会对超低频振荡产生影响, 与此同时励磁系统中所含有两个环节中, 有一个环节提供超前相位, 而另一环节则提供滞后相位, 在这种情况下, 励磁系统并不会对超低频振荡产生较大的影响, 为了能够更加明确励磁环节对超低频振荡不会产生影响的原因, 集合励磁环节矩阵对励磁环节相关参数对相应的特征根产生的影响进行全面的分析。如果励磁参数在合理的范围内不断变化, 那么特征根并不会随之发生较大的变化, 由此可以表明, 励磁系统所包含的各环节的参数如果发生变化, 并不会对超低频振荡特性产生影响。在励磁环节加入之前以及加入之后, 机组调速器发生一定的变化, 但特征根并没有发生改变, 表明, 励磁环节并不会对超低频振荡特性造成较大的影响。将加入励磁环节以及不加入励磁环节的特征根进行对比与分析, 并结合机组调速器设置参数以及励磁参数出现变化对特征根轨迹产生的影响, 明确了励磁调节对超低频振荡并无影响的主要原因。根据无励磁状态空间模型可以发现, 产生超低频振荡的原因为调速器参数以及水轮机参数并不合理, 使得特征根虚部的振荡频率比较低, 处于超低频振荡频段之内, 从而很好的验证了在采用阻尼转矩法对超低频振荡问题发生机制进行分析时, 不将励磁环节考虑在内是合理的。

3 仿真研究与分析

3.1 单机无穷大系统振荡特性进行仿真

3.1.1 无 PSS 对单机无穷大系统参数产生的影响

对于加入励磁调节的单机无穷大系统来说, 低频振荡模式是其主导的振荡模式, 与状态空间模型所得出的振荡频率并没有太大的差异性, 同时在调速器参数不断变化的情况下并不会对系统振荡特性产生影响, 由此可以表明励磁影响下所形成的振荡模式与调速器振荡模式之间完全解耦。在励磁参数不断变化下会对系统振荡特性产生一定的影响, 很好的验证了: 单机无穷大系统出现超低频振荡的概率比较小。

3.1.2 PSS 的影响

结合之前的整定值, PSS 参数仿真结果为下图所示。通过 TLS-ESPRIT 算法的应用对三条曲线的阻尼比进行有效的辨识, 最终发现 PSS 可以为系统提供一定的正阻尼转矩, 能够有效的避免低频振荡。

3.2 影响超低频振荡因素的仿真

3.2.1 调速器参数

对于单机带负荷系统而言, 如果 KP 不断增加, 那么系统阻尼比呈先增后减的变化趋势, 系统有很大概率会从原本的超低频振荡变成低频振荡, 随着 Ti 不断增加, 阻尼比也会随之不断增加, 随着 TW 不断增加, 则阻尼比就会随之不断减小, 与理论分析所得结果相一致。

3.2.2 励磁调节

通过上述内容可以发现, 励磁参数发生变化并不会对超低频振荡造成较大的影响, 同时在加入或者是不加入励磁环节的条件下, 系统振荡频率以及阻尼比之间并没有太大的差异性, 由此直接表明励磁调节并不会对超低频振荡造成较大的影响。

3.2.3 PSS

在 PSS 加入之前与之后, 系统振荡频率以及阻尼比没有发生较大的改变, 由此表明 PSS 并不能很好的抑制超低频振荡。

4 结论

(1) 未加入励磁调节的单机无穷大系统出现超低频振荡的概率比较低; (2) 单机无穷大系统若具有励磁, 那么系统主要振荡模式为励磁形成的低频振荡, 参数在规定的范围内不断变化, 低频振荡不容易改变成超低频振荡; (3) 单机带负荷系统出现超低频振荡的概率比较低, 在合理的范围内将 KP 与 K_i 之间的比值增加, 可以有效的避免超低频振荡的出现; (4) 励磁环节以及励磁参数的变化并不会对系统振荡特性造成影响。

参考文献:

- [2] 邓伟, 王德林, 魏蒙希, 等. 水轮机调速器参数对电力系统超低频振荡的影响[J]. 电网技术, 2019, 43(4):
- [4] 刘春晓, 张俊峰, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的机理分析与仿真[J]. 南方电网技术.
- [5] 张建新, 陈刚, 周剑, 等. 采用调速器附加阻尼控制抑制异步后云南电网超低频振荡[J]. 南方电网技术, 2018.