# 一种基于转矩理论的低频振荡实用计算方法

# 一、基本原理

## 1.1 对功率振荡分类

电力系统的功率振荡可根据振荡频率及振荡源的不同进行多种划分。

低频振荡表现为发电机转子角、转速以及相关电气量如机组功率、母线电压等近似等幅或增幅的振荡，其振荡频率一般在0.1～3Hz之间。

根据振荡源的不同，低频振荡可以分为两种情况，一种是系统阻尼转矩不足导致的振荡，转矩理论认为励磁系统高比例增益、系统间弱联系、重负载导致系统参数发生了实时变化，使系统的阻尼转矩变为零或者为负值，因而引发了自发的低频振荡。另一种是外部干扰，如原动机机械原因导致的强迫振荡，转矩理论认为外部的强迫能量叠加在系统上阻尼转矩上，使系统总的阻尼转矩变为零或者负值，因而引发的被迫的低频振荡。

## 1.2 小干扰振荡处理方法

关于小干扰振荡一般有两种计算方法，一种是采用状态方程描述发电机及其连接的系统，通过计算状态方程的特征根来判断振荡的特性。国内常用的电网计算软件如PSASP和BPA采用这种方法，其优点在于可以利用状态方程精确描述系统的特性，缺点在于物理概念不够清晰，难以透过状态方程看出低频振荡的物理特征。另一种是采用传递函数描述发电机及其连接的系统，通过转矩理论计算阻尼转矩判断振荡的特性。该方法优点在于物理概念清晰，可以通过简单的计算定性判断低频振荡的特性，在振荡原因快速定性上有很好的应用；缺点在于表达的系统规模有限并且不利于计算机大规模处理，常用于描述单机-无穷大系统。

## 1.3 转矩理论的原理

单机-无穷大系统的Philips-Heffron模型适于小干扰下的低频振荡等现象。该模型认为在小干扰下，电力系统的方程组可线性化处理，以变化量作为新的变量形成新的方程组（参考刘取书）:

∆Te=k1∆δ+k2∆Eq’

∆Eq’=k3/(1+sk3Td0’)(∆Efd-k4∆δ)

∆Ut=k5∆δ+k6∆Eq’

∆δ=ω0/(s2Tj)(∆Tm-∆Te)

该方程组的传递函数模型图为

对方程组进行整理，将电磁转矩中由励磁系统贡献的部分提取出来，得到（参考刘取书）

∆Te2=KSe∆δ+KDe∆ω

其中KSe为同步转矩系数，KSe∆δ整体为励磁系统提供的同步转矩，KDe为阻尼转矩系数，KDe∆ω整体为励磁系统提供的阻尼转矩。如需判断励磁系统提供的阻尼转矩则只需计算阻尼转矩系数KDe，如KDe为正，则励磁系统提供的是正的阻尼转矩，有益于系统低频振荡的平息，如KDe为负，则励磁系统提供的是负的阻尼转矩，不益于系统低频振荡的平息。

原动机对应的转矩∆Tm同理可表示为

∆Tm=KSm∆δ+KDm∆ω

其中KSm为同步转矩系数，KSm∆δ整体为原动机系统提供的同步转矩，KDm为阻尼转矩系数，KDm∆ω整体为原动机系统提供的阻尼转矩。如需判断原动机系统提供的阻尼转矩则只需计算阻尼转矩系数KDm，如KDm为正，则原动机系统提供的是负的阻尼转矩，不利于系统低频振荡的平息，如KDm为负，则原动机系统提供的是正的阻尼转矩，有益于系统低频振荡的平息。

电磁阻尼转矩系数与原动机阻尼转矩系数符号相同时将表示不同的转矩性质，原因是原动机的转矩是动力转矩，电磁转矩是平衡转矩。在Philips-Heffron模型中，电磁转矩在叠加点均为负号，原动机转矩在叠加点为正号，当电磁转矩的阻尼转矩系数为正时，在叠加点表现将为负值，则原动机转矩的阻尼转矩系数在叠加点为负值时才能与电磁转矩的阻尼转矩有同样的性质。

对于判断励磁系统或者原动机系统在低频振荡中的贡献，只需要考虑两个系统的阻尼转矩，并计算相应的阻尼系数即可，在实际处理上就对应着从测量数据中提取相关数据并计算KDm与KDe。

## 1.4 利用PMU数据进行功率振荡分析的思路

当电力系统对发电厂及变电站实行较为精确的监控及故障诊断时，常采用同步相量测量（PMU）数据。PMU数据的特点是数据均为相量，并且记录了相量的幅值及相角，但通常相角数据不够准确。

如果利用PMU数据进行低频振荡分析，则需依托Philips-Heffron模型以及转矩理论。通常直接采集到的PMU数据并不符合模型数据格式，不能将数据直接代入模型中计算相关参数，因而需要分析模型数据的特点，对PMU数据进行处理，得到适合模型数据的格式，进而依托模型进行分析。

与PMU数据为相量不同，Philips-Heffron模型中的变量为相量偏差量的相量，也就是说需要对PMU相量数据先求偏差量，然后对偏差量进行相量处理才能用于Philips-Heffron模型。

## 1.5 对低频振荡信号特征的分析

1.5.1 低频振荡信号形式分析

根据Philips-Heffron模型，低频振荡时的电气量由原始稳态量和某一频率的低频振荡量构成，原始稳态量基频（ω0）大约在50Hz左右，低频振荡频率（ω1）大约在1Hz左右。实际采样的信号中，低频振荡量与原始稳态量并非直接的叠加，而是低频振荡量叠加在原始稳态信号的幅值上。

如果对低频振荡信号的处理不考虑两种振荡频率相差较大的特征，一般需对原始信号的瞬时值进行FFT分解，然后对分解的量分别进行处理，最后再分别对处理结果进行物理量的叠加。但这种方式未考虑低频振荡的物理特征，处理过程较为复杂，如考虑低频振荡的信号特征，则可简化对信号的处理。

由于基频和低频振荡频率相差较大，对应周期相差较大，因此可近似认为基频ω0下，频率为ω1的振荡信号幅值基本不变。频率为ω0的基频信号仍然满足相量处理的条件，可以继续作为相量进行处理，即低频振荡时基频下的相量关系依然近似成立。按照这种处理方式来考虑暂态交轴电势Eq’，实际采集的数据应具有形式：

Eq’(原始)={AEq’0+[AEq’1sin(ω1t+αEq’1)+cEq’1]}sin(ω0t+αEq’0)+cEq’0

对于原始稳态信号并非相量的信号，如电角速度ω，其信号结构应该为稳态直流量和低频振荡相量叠加，实际采集的数据应具有形式：

ω(原始)=Aω0+[Aω1sin(ω1t+αω1)+cω1]

采集的信号经过PMU的数据处理，幅值信息将被提取出来，信号变为：

Eq’(PMU)=AEq’0+[AEq’1sin(ω1t+αEq’1)+cEq’1]

ω(PMU)=Aω0+[Aω1sin(ω1t+αω1)+cω1]

对于PMU采集后的数据，进一步人工滤除直流信息，得到用于Philips-Heffron模型的数据将是

Δω(PH)=Aω1sin(ω1t+αω1)，相量形式为∆ω=Aω1∠αω1

ΔEq’(PH)=AEq’1sin(ω1t+αEq’1)，相量形式为∆Eq’=AEq’1∠αEq’1

1.5.2 低频振荡中机端电压的特点

从控制原理上分析，由于机组一般采用微机励磁调节器，控制目标是保证机端电压恒定。以目前广泛使用的静态自并励励磁控制系统为例，在3.3ms左右即可完成对励磁电压的控制，而低频振荡的周期在300ms以上，远大于励磁控制的周期，因此在低频振荡过程中，可认为励磁系统能够很快地控制机端电压稳定，因此在低频振荡中，机端电压基本是不变的，低频振荡中的有功功率的波动基本由机端电流引起。

1.5.3 功率因数角和功角

功角关系图

如1.5.1中分析，低频振荡时基频下的相量关系依然近似成立，则按相量关系图可计算功率因数角θ和功角δ。

功角 δ=arctan[P/(Q+U\*U/Xq)]

功率因数角 θ=arctan(Q/P)

## 1.6 低频振荡信号的投影

根据Philips-Heffron模型，励磁系统提供的电磁转矩ΔTe2正比于ΔEq’，通过计算ΔEq’对Δω的投影即可计算励磁系统提供的电磁转矩ΔTe2对阻尼转矩的贡献。在Δω轴正方向投影为正则该力矩有正阻尼分量，在Δω轴正方向投影为负则该力矩有负阻尼分量。

对于相量而言，计算∆Eq’向Δω的投影时，实际上是计算∆Eq’与∆ω共轭的乘积，即

∆Eq’∆ω\* =AEq’1Aω1cos(αEq’1−αω1)

对应PMU滤波后的实际值，实时乘积计算有

∆Eq’∆ω =AEq’1Aω1sin(ω1t+αEq’1)sin(ω1t+αω1)

=(AEq’1Aω1/2)[cos(αEq’1−αω1)−cos(2ω1t+αEq’1+αω1)]

实时乘积的表达式包含一个直流分量和两倍频低频振荡分量，其中的直流分量即为两个相量间的投影量。为得到直流分量，一是可以通过滤波方式，二是可以通过积分求和消除两倍频分量得到直流分量。

## 1.6 电磁转矩及原动机转矩计算问题

根据ΔEq’=ΔUtq+xd’ΔId，从PMU数据中提取ΔUtq及ΔId即可计算励磁电磁力矩ΔEq’，对Δω的投影可通过计算两者的实时乘积滤波得到。

原动机系统提供的ΔTm可通过实测的ΔTe及相关参数计算得到，ΔTm对Δω的投影即可计算原动机系统提供的机械转矩对阻尼转矩的贡献。但在Δω较小的情况下，ΔTm正比于ΔPm，可用ΔPm对Δω的投影代替ΔTm对Δω的投影。根据ΔPm=ΔPe+TjdΔω/dt，从PMU数据中提取ΔPe及Δω可计算原动机机械功率，对Δω的投影可通过计算两者的实时乘积滤波得到。

## 1.7 流程图

# 二、对小干扰稳定分析的方法

## 2.1 对PMU数据的两次处理。

## 2.2 相角的计算方法，对不同相角计算方法的讨论。

## 2.3 对周期较短的信号的处理方法，能否采用延拓的方法。

## 2.4 能否进行实时计算。

# 三、理论算例分析

## 3.1 构造单机-无穷大系统模型，人为生成低频振荡

## 3.2 针对单机-无穷大系统生成HP模型，校验单机-无穷大系统的结论

## 3.3 利用单机-无穷大系统数据验证低频振荡判别方法

# 四、实例计算分析

## 4.1 黑麋峰振荡

## 4.2 碗米破振荡

## 4.3 攸县振荡

## 4.4 常德振荡

# 五、结论

本文提出一种基于PMU测量数据的低频振荡判别方法，为确定低频振荡的振荡源、快速事故处理提供依据。本文首先分析了利用PMU数据进行转矩理论分析低频振荡的可行性，形成了利用转矩理论计算阻尼转矩的步骤。对两例实际低频振荡进行了分析计算，理论计算分析结果与实际振荡原因一致，表明低频振荡判别方法的可行性和有效性。