# 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

低频振荡的单机-无穷大系统Philips-Heffron模型提出在小干扰下，电力系统的方程组可进行线性化处理，按变化量形成新的方程组（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)

对应的原理图为

对方程组进行整理，将电磁转矩中与励磁系统相关的部分提取出来，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正的阻尼转矩，有益于系统低频振荡的平息，如KDm为负，则原动机系统提供的是负的阻尼转矩，不益于系统低频振荡的平息。

因此对于判断励磁系统或者原动机系统在低频振荡中的作用，只需要考虑两个系统提供的阻尼转矩，并通过计算相应的阻尼系数即可。因此，如何将KDm与KDe从检测的数据中分离出来成为了将要解决的主要问题。

## 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。低频振荡量与原始稳态量并非直接的叠加，而是在原始稳态信号的幅值上叠加。由于基频和低频振荡频率相差较大，对应周期相差较大，因此可近似认为在频率为ω0的振荡下，频率为ω1的振荡的幅值基本不变。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。以暂态交轴电势Eq’为例，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]

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，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。

采集的信号经过PMU的数据处理后，将为

ω(PMU)=Aω0+[Aω1sin(ω1t+αω1)+cω1]

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

对于PMU采集后的数据，进一步处理得到，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 机端电压

从控制上分析，机组一般带有励磁调节器，并以机端电压稳定为控制目标。以静态自并励励磁控制系统为例，对励磁电压的控制可在20/6=3.3ms左右实现，而低频振荡的周期在500ms以上，远大于励磁控制的周期，因此在低频振荡过程中，可认为在励磁系统的控制下机端电压是不变的。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

功率因数角θ和功角δ仍然按照相量图来计算。

功角 δ=arctan[P/(Q+U\*U/Xq)]

功率因数角 θ=arctan(Q/P)

对于整个处理过程而言，原始数据从PMU装置取得，为已知的相量数据。用于PH模型的数据需基于PMU数据进一步处理，通过滤波以及相量化得到低频振荡量的相量表示。

## 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。