一种基于转矩理论的低频振荡实用计算方法

一、适用范围

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小结

关于小干扰振荡的计算一般有两种方法，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，透过状态方程难以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）：

$\Delta Te=k1\Delta\delta+k2\Delta Eq'$

$\Delta Eq'=k3/(1+sk3Td0')(\Delta Efd-k4\Delta\delta)$

$\Delta Ut=k5\Delta\delta+k6\Delta Eq'$

$\Delta\delta=\omega 0/(s^2Tj)(\Delta Tm-\Delta Te)$

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)

$$\Delta Te2=KSe\Delta\delta+KDe\Delta\omega$$

其中 KSe 为同步转矩系数，KSeΔδ整体为励磁系统提供的同步转矩，KDe 为阻尼转矩系数，KDeΔω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。

进而对于原动机对应的转矩ΔTm 而言，同理可表示为

$$\Delta Tm=KSm\Delta\delta+KDm\Delta\omega$$

其中 KSm 为同步转矩系数，KSmΔδ整体为原动机系统提供的同步转矩，KDm 为阻尼转矩系数，KDmΔω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 如何处理 **PMU** 数据进行功率振荡分析

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，并且记录的均为相量的幅值，并未记录相角数据。

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 对低频振荡信号的分析

以机端电压、机端电流为例为例，根据 Philips-Heffron 模型，低频振荡时系统电气量在原始相量的基础上，会形成某一频率的低频振荡相量，因此按照相量的定义，低频振荡应叠加在原始信号的幅值上，实际采集的数据应具有形式

Ut(原始)={Ut0+[Ut1sin(ω1t+αu1)+cu1]}sin(ω0t+αu0)+cu0

It(原始)={It0+[It1sin(ω1t+αi1)+ci1]}sin(ω0t+αi0)+ci0

采集的信号经过 PMU 的数据处理后，将为

Ut(PMU)=Ut0+[Ut1sin(ω1t+αu1)+cu1]

It(PMU)=It0+[It1sin(ω1t+αi1)+ci1]

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

$\Delta Ut(PH)=Ut1\sin(\omega 1t+\alpha u1)$，相量形式为$\Delta\dot{U}t=Ut1\angle\alpha u1$

$\Delta It(PH)=It1\sin(\omega 1t+\alpha i1)$，相量形式为$\Delta It=It1\angle\alpha i1$

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

根据转矩理论，需要当需要考察一个力矩的性质时，只需要计算该力矩向Δω轴的投影即可，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，比如计算 $Ut1\angle\alpha u1$ 向 $It1\angle\alpha i1$ 的投影时，对于相量而言，实际上是计算

$$\Delta\dot{U}t*\overline{\Delta\dot{I}t}=Ut1It1\cos(\alpha u1-\alpha i1)$$

对应 PMU 滤波后的实际值，实时乘积计算有

$$\Delta Ut\Delta It=Ut1It1\sin(w1t+\alpha u1)\sin(w1t+\alpha i1)$$
$$=\frac{Ut1It1}{2}[\cos(\alpha u1-\alpha i1)-\cos(2w1t+\alpha u1+\alpha i1)]$$

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 Philips-Heffron 模型，励磁系统提供的电磁转矩$\Delta Te2$正比于$\Delta Eq'$， 通过计算$\Delta Eq'$对$\Delta\omega$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。

根据$\Delta Eq'=\Delta Utq+xd'\Delta Id$，从 PMU 数据中提取$\Delta Utq$及$\Delta Id$即可计算励磁电磁力矩$\Delta Eq'$，对$\Delta\omega$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$\Delta\omega$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$\Delta\omega$较小的情况下，ΔTm正比于ΔPm，可计算ΔPm对$\Delta\omega$的投影代替ΔTm对$\Delta\omega$的投影。根据$\Delta Pm=\Delta Pe+Tj\,d\Delta\omega/dt$，从 PMU 数据中提取$\Delta Pe$及$\Delta\omega$可计算原动机机械功率，对$\Delta\omega$的投影可通过计算两者的实时乘积滤波得到。

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 黑麇峰振荡

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。