# 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 对功率振荡进行分类，指出本文适用的范围及类型

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、重负载导致了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，转矩理论认为是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。

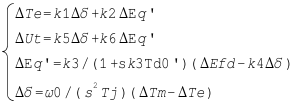
~~对于低频振荡，常使用转矩理论解释其机理。首先，转矩理论认为发电机及其所连接电力系统组成的非线性系统在小电气量干扰下可近似线性化处理，线性处理的结果由一个传递函数模型来表示。其次，按该模型的表述，机组电磁力矩可分解为同步转矩及阻尼转矩。对于高比例增益的励磁系统及重负载情况，机组电磁力矩中的阻尼转矩部分将为负值，可能导致整个系统阻尼转矩和为零或者负值，因而导致模型特征根出现零或者接近于零实部，对应现实中的低频振荡。~~

## 1.2 对处理小干扰振荡的方法进行总结

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，然后计算状态方程的特征根，通过特征根的特性判断振荡的特性。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清晰，不利于通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，通过转矩理论计算阻尼转矩判断振荡的特性。该方法物理概念清晰，可以通过简单的计算定性判断低频振荡的特性，对快速事故定性有很好的应用。

## 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）:



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）



其中KSe为同步转矩系数，整体为励磁系统提供的同步转矩，KDe为阻尼转矩系数，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而言，同理可表示为



其中KSm为同步转矩系数，整体为原动机系统提供的同步转矩，KDm为阻尼转矩系数，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KDm与KDe即可。因此，如何将KDm以及KDe从检测的数据中分离出来成为了将要解决的问题。

## 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

，



采集的信号经过PMU的数据处理后，将为





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

，相量格式为

，相量格式为

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。

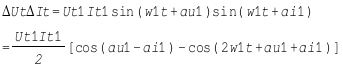
## 1.6 低频振荡信号的投影

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轴的投影即可，在轴正方向投影为正则该力矩有正阻尼分量，在在轴正方向投影为负则该力矩有负阻尼分量。

对于相量而言，比如计算向的投影时，对于相量而言，实际上是计算



对应PMU滤波后的实际值，实时乘积计算有



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正比于，通过计算对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，从PMU数据中提取及即可计算励磁电磁力矩，对的投影可通过计算两者的实时乘积滤波得到。

原动机系统提供的可通过实测的及相关参数计算得到，对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。但在较小的情况下，正比于，可计算对的投影代替对的投影。根据，从PMU数据中提取及可计算原动机机械功率，对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。