# 基于等效电路法的负阻尼能量机理及振荡源定位方法探讨

杨毅强1,2,刘天琪1,李兴源1,王锋1,赵睿1

(1.四川大学电气信息学院,四川省成都市 610065; 2.四川理工学院自动化与电子信息学院,四川省自贡市 643000)

摘要:为解释自由振荡中产生振荡源的机理,在能量法基础之上提出了等效电路法。对电力系统 各元件分别建立了其等效电路并组合得到系统的等效电路。根据电路理论,将积分形式的振荡源 定位判据转化为相量判据。对于励磁系统,提出了3种振荡源定位判据。将这3种判据转化为相 量形式并组合,分析了励磁系统产生振荡源的机理。算例仿真证明了该分析方法的正确性和有效 性。该方法可用于在线定位励磁系统振荡源,并分析由于励磁参数设定不当而形成振荡源的机理。 关键词:等效电路法;振荡源定位;负阻尼能量机理;励磁系统

# 0 引言

电力系统低频振荡是威胁电网安全运行的突出 问题。根据其机理的不同,低频振荡大致分为两类: 一类是弱阻尼(或负阻尼)自由振荡<sup>[1]</sup>,这一类振荡 通常与薄弱的电网架构、特殊的运行方式等因素有 关;另一类是强迫振荡,这类振荡由非自治周期性扰 动引发,如发电机机组的机械故障、调速系统异常压 力脉动等<sup>[2]</sup>。这些导致系统强迫振荡的非自治周期 性扰动就是振荡源,定位振荡源是应对强迫振荡的 有效方法。现有能量法不仅可以定位到振荡源所在 的发电机<sup>[3+5]</sup>,定位到发电机控制设备<sup>[6]</sup>,还可以评 估端口外的设备对振荡起到的是抑制还是激励的作 用<sup>[7]</sup>。

在弱阻尼(或负阻尼)自由振荡发生时,用定位 强迫振荡源的方法,可以找到注入振荡能量的设备。 振荡能量注入会削弱系统阻尼,振荡的能量机理与 负阻尼机理存在一致性<sup>[8•9]</sup>。所以,自由振荡中注入 振荡能量的设备也可被称为振荡源。与强迫振荡相 同的是,弱阻尼(或负阻尼)自由振荡是由振荡源注 入振荡能量造成的;与强迫振荡不同的是,自由振荡 发生时,控制系统按照预先设定的方式工作,并没有 非自治周期性扰动产生。一个按照设定方式工作的 设备为什么会成为振荡源,是一个值得研究的问题。

本文在能量法基础之上,提出了等效电路法,对 发电机励磁系统振荡源的形成原因进行分析。在分 析电力系统能量结构的基础之上,对系统各元件建

- 收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-11-08。
- 国家自然科学基金资助项目(51037003)。

立等效电路并组合,得到全系统等效电路。结合电路理论,将积分形式振荡源定位判据转化为相量形式的判据。根据等效电路得出3种励磁系统振荡源定位判据。将3种判据转化为相量形式并组合,用相量分析的方法对励磁参数变化造成系统负阻尼的能量机理进行了分析。

## 1 三阶等效电路法

单机电力系统如图 1 所示,发电机经电抗为 x的输电线路 ij 向负荷供电,节点 i 电压幅值和相位 分别为  $V_i$  和  $\theta_i$ ,有功功率和无功功率分别为  $P_i$  和  $Q_i$ 。



发电机采用三阶模型[10]:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \Delta \omega_{\rm r} \\ M \Delta \dot{\omega}_{\rm r} = P_{\rm m} - P_{\rm e} - D \Delta \omega_{\rm r} \\ T_{\rm dr}' \dot{E}_{\rm r}' = E_{\rm f} - E_{\rm r}' - (r_{\rm d} - r_{\rm d}') i_{\rm d} \end{cases}$$
(1)

式中: $\delta$  为发电机功角; $\Delta\omega_r$  为发电机转速偏差; M 为惯性时间常数; $P_m$  为发电机机械功率; $P_e$  为 发电机电磁功率;D 为发电机阻尼系数; $T_{do}'$ 为d 轴 开路暂态时间常数; $E_q'$ 为q 轴瞬变电动势; $E_f$  为定 子励磁电动势; $x_d$  为d 轴同步电抗; $x_d'$ 为d 轴瞬变 电抗; $i_d$  为d 轴定子电流。

结 合 Tsolas-Arapostathis-Varaiya 模 型<sup>[11]</sup>

(TAV 模型)能量函数,以及 Hamilton 法、能量结构法拆分发电机机械系统和电磁系统的技巧,可得 到该系统的能量结构,如图 2 所示,其中  $\Delta \omega_i = \dot{\theta}_i$ ,  $\Delta \omega_j = \dot{\theta}_j$ ,  $Q_{ein} = E_q' i_d = (E_q')^2 / x_d' - E_q' V_i \cdot \cos(\delta - \theta_i) / x_d'$ ,其余变量参考文献[10]。图 2 具体导出过程见附录 A。



Fig.2 Energy structure for single-generator system

基于发电机三阶模型以及 TAV 模型能量结构,可提出三阶等效电路法。对发电机磁链衰减方程、发电机内支路、网络支路分别建立等效电路,具体构建过程见附录 B。结合原有等效电路法<sup>[12]</sup>,将图 1 所示系统各部分等效电路集成,则得到该系统等效电路,如图 3 所示。图中,Δ 表示相应量的偏差量。



Fig.3 Equivalent circuit for single-generator system

图 3 中,用箭头表示广义电流的参考方向,用正 负号表示广义电压的参考方向。用电阻表示耗散元 件,用电容表示动能储能元件,用电感表示势能储能 元件。调速系统、励磁系统、有功负荷、无功负荷为 潜在振荡源,它们既可能向系统中注入振荡能量,也 可能吸收振荡能量,根据替代定理,它们均用理想电 源表示。广义电压与广义电流相乘后得到振荡能量 功率,对比图 3 与图 2 可知,等效电路的振荡能量功 率与图 2 暂态能量功率保持一致。不同的是,振荡 能量功率用偏差量计算,振荡能量是暂态能量的一 个分量。单机系统的等效电路建立方法可以扩展到 任意复杂的多机系统。在建立等效电路后,可以直接用电路理论进行低频振荡问题分析。

## 2 相量形式的振荡源定位判据

相量法是重要的电路分析方法之一。根据这一 方法,可以把振荡源积分形式的定位判据转换为相 量判据。

在等效电路中,振荡源定位就是判断电路中的 理想电源是电源还是负荷。如果理想电源是一个电 源,则为振荡源;反之则不是振荡源。振荡源定位方 法如图4所示,其中 u1和 u2表示广义电压,*i*表示 广义电流,振荡源定位的判据为:



Fig.4 Method for locating oscillation source

式(2)所计算的积分曲线如果向上倾斜,表明电 源注入能量,理想电源为振荡源。在实际应用时,若 要在振荡能量注入与系统阻尼比间建立联系,需要 首先用类似于 Prony 的算法提取某一个模式的广义 电压和广义电流,再计算该模式的振荡能量<sup>[9]</sup>。振 荡模式 σ+jω 所对应的广义电压和广义电流均为幅 值变化的正弦函数:

$$u_1 = U_{1m} e^{\omega} \cos(\omega t + \varphi_1) \tag{3}$$

$$u_2 = U_{2m} e^{\sigma} \cos(\omega t + \varphi_2) \tag{4}$$

$$i = I_{\rm m} e^{\sigma t} \cos(\omega t + \varphi_i) \tag{5}$$

式中: $\sigma$  为衰减因子; $\omega$  为振荡频率; $U_{1m}$ 和 $U_{2m}$ 分别 为余弦量 $u_1$ 和 $u_2$ 的幅值; $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 分别为余弦量  $u_1$ 和 $u_2$ 的初相位; $I_m$ 和 $\varphi_i$ 分别为余弦量i的幅值 和初相位。

可以将瞬时值用相量表示,如 u1 可表示为:

$$\widetilde{U}_1 = U_{1m} e^{\sigma t} e^{j(\omega t + \varphi_1)}$$
(6)

或简单记为:

$$\widetilde{U}_1 = U_{1\mathrm{m}} \angle \varphi_1 \tag{7}$$

瞬时值与相量之间的关系为:

$$u_1 = \operatorname{Re}(\widetilde{U}_1) \tag{8}$$

同理,其余两个值也可用相量表示:

$$\widetilde{U}_2 = U_{2\mathrm{m}} \mathrm{e}^{\sigma t} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t + \varphi_2)} = U_{2\mathrm{m}} \angle \varphi_2 \tag{9}$$

$$\widetilde{I} = I_{\rm m} e^{\sigma t} e^{j(\omega t + \varphi_i)} = I_{\rm m} \angle \varphi_i \qquad (10)$$

结合电路理论,可以将积分形式的判据转化为 相量形式,可得出如下4种振荡源定位判据。 1)判据1:计算理想电源提供的有功功率

$$P_{1} = \operatorname{Re}\left(\frac{1}{2}\widetilde{U}_{1}\widetilde{I}^{*}\right) = \frac{1}{2}U_{1m}I_{m}e^{2\sigma t}\cos(\varphi_{1}-\varphi_{i})$$
(11)

式中:"\*"表示共轭。

若 $P_1 > 0$ ,理想电源为振荡源。

2)判据 2:计算理想电源的等效电导

$$G = \operatorname{Re}\left(\frac{-\tilde{I}}{\tilde{U}_{1}}\right) = -\frac{I_{m}}{U_{1m}}\cos(\varphi_{i} - \varphi_{1}) \quad (12)$$

这一判据相当于把理想电源当做阻抗串联构成 的电路,若电导 G < 0,相当于串联电阻阻值为负数, 理想电源为振荡源。

3)判据 3:根据电压和电流相位差(即式(13)) 判断

$$\mid \varphi_1 - \varphi_i \mid \tag{13}$$

式(11)和式(12)的正负由 $|\varphi_1 - \varphi_i|$ 确定,当  $|\varphi_1 - \varphi_i| < 90^{\circ}$ 时,理想电源为振荡源。

4)判据4:根据电感支路相邻节点的电压相位 差(即式(14))判断

$$\varphi_1 - \varphi_2$$
 (14)

根据感性电路有功功率流动方向与电压相位的 关系,当 $\varphi_1 - \varphi_2 > 0^{\circ}$ 时,理想电源为振荡源。

在振荡源定位研究中,通常使用定位判据 1。 在某些情况下,也有必要使用其他判据。如将调速 系统振荡源定位判据  $\int \Delta P_{\rm m} \Delta \omega_{\rm r} dt$  用定位判据 2 表 示,则为 Re( $-\Delta \tilde{P}_{\rm m} / \Delta \tilde{\omega}_{\rm r}$ )。若调速系统传递函数  $G_{\rm tg}(s)$  为:

$$P_{\rm m} = G_{\rm tg}(s)(1 - \omega_{\rm r}) \tag{15}$$

当针对振荡模式  $\sigma$  + j $\omega$  进行分析时, Re $(-\Delta \tilde{P}_m/\Delta \tilde{\omega}_r)$ 满足:

$$\operatorname{Re}\left(\frac{-\Delta \tilde{P}_{m}}{\Delta \tilde{\omega}_{r}}\right) = \operatorname{Re}(G_{tg}(\sigma + j\omega)) \approx \operatorname{Re}(G_{tg}(j\omega)) = K_{D}$$
(16)

由式(16)可知,Re( $-\Delta \tilde{P}_{m}/\Delta \tilde{\omega}_{r}$ )是对调速系统 阻尼转矩系数 $K_{D}^{[13:14]}$ 的近似计算,阻尼转矩系数 与调速系统等效电导具有一致性。

#### 3 励磁系统振荡源定位判据

励磁系统产生的负阻尼是造成低频振荡的主要 原因。由负阻尼机理与能量机理的一致性<sup>[so]</sup>可知, 当励磁系统注入振荡能量,即说明其产生了负阻尼。 所以,用振荡源定位的方法,可以判断励磁系统是否 产生了负阻尼。对图3所示的发电机电磁系统等效 电路作戴维南等效变换,变换后的发电机等效电路 如图5所示,其中最右端两个箭头表示外部系统。



图 5 戴维南形式的发电机等效电路 Fig.5 Equivalent circuit of generator in Thevenin form

图 5 所示等效电路中,电阻值仍然为( $x_d - x_d'$ )/ $T_{u0}'$ 。电压源的电压为:

$$\frac{\Delta E_{\rm f}}{x_d - x_d'} \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}'} = \frac{\Delta E_{\rm f}}{T_{d0}'} = \frac{x_{\rm ad}}{x_{\rm f}} \Delta u_{\rm f} \quad (17)$$

式中: $\Delta E_f$ 为  $E_f$ 的偏差量; $\Delta u_f$ 为励磁电压偏差量;  $x_{ad}$ 为发电机 d 轴绕组互感抗。

根据图 5,可得出 3 个励磁系统振荡源定位判据,在图 5 中由红色椭圆框 Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ表示。如果椭圆框中的能量向右流动,即说明其左侧存在振荡源。

判据 I:根据图 5 可得到励磁振荡源定位判据 I 如式(18)所示。

$$\int \frac{\Delta E_{\rm f}}{T_{d0'}} \frac{\Delta E_{\rm q}}{x_d - x_d'} dt = \int \Delta u_{\rm f} \Delta i_{\rm f} dt \qquad (18)$$

式中: $\Delta i_f$ 为励磁电流偏差量; $\Delta E_q$ 为发电机空载电动势偏差量。

式(18)表示励磁系统注入发电机转子的振荡能量,与振荡能量法<sup>[9]</sup>的推导结果一致。相对于用恒定电压励磁,励磁系统注入振荡能量会削弱系统阻尼。此时励磁系统呈现负阻尼。对没有实时测量励磁电流的发电机,可以通过计算其 *E* , 获得 *i* , 。

判据Ⅱ:图5中椭圆框Ⅱ中流过的振荡能量如式(19)所示。

$$\int \frac{x_{\rm f}}{x_{\rm ad}} \Delta i_{\rm f} \Delta \dot{E}_{q}' {\rm d}t = \int \Delta i_{\rm f} \Delta \dot{\phi}_{\rm f} {\rm d}t \qquad (19)$$

根据励磁绕组微分方程,式(19)的磁链微分可 以按式(20)计算:

$$\Delta \dot{\psi}_{\rm f} = \dot{\psi}_{\rm f} = u_{\rm f} - r_{\rm f} i_{\rm f} \tag{20}$$

励磁绕组的电阻  $r_{\rm f}$  可以用稳态时的励磁电压  $u_{\rm f0}$ 和励磁电流  $i_{\rm f0}$ 计算:

$$r_{\rm f} = \frac{u_{\rm fo}}{i_{\rm fo}} \tag{21}$$

将式(20)和式(21)代入式(19)可将判据 II 中的 磁链微分  $\Delta \dot{\phi}_i$  消去:

$$\int \frac{x_{\rm f}}{x_{\rm ad}} \Delta i_{\rm f} \Delta \dot{E}_{\rm g}' dt = \int \Delta i_{\rm f} \left( u_{\rm f} - \frac{u_{\rm f0}}{i_{\rm f0}} i_{\rm f} \right) dt \quad (22)$$

式(22)中的变量都是可以直接测量的,因而判据 II 也是一种实用的振荡源定位判据。

根据能量结构法与振荡能量法的推导,在发电 机三阶和四阶模型中, $\int \Delta i_i \Delta \dot{\psi}_i dt = \int i_d \dot{u}_q dt$ 中含有 的耗散分量相同,这两个指标实质上是等效的。与 判据 I 相比,判据 II 的计算结果偏乐观。在三阶 模型中,如果通过判据 II 判定某发电机存在振荡 源,则该发电机呈现负阻尼。

判据Ⅲ:图 5 椭圆框Ⅲ中的能量向右流动时,可 以作为发电机内部存在振荡源的判据,此时该发电 机呈现负阻尼。但判据Ⅲ不能单独作为发电机励磁 系统负阻尼判据,如果调速系统为负阻尼振荡,其注 入的振荡能量可能沿节点 1→2→4 流动。因此,判 据Ⅲ的实用性低于判据 I 和判据Ⅱ。其主要作用是 与前两个判据组合,对励磁系统形成振荡源的机理 进行分析。

#### 4 励磁系统负阻尼能量机理分析

在定位励磁系统振荡源之后,还需要解释励磁 系统为什么会成为振荡源。这里提出一种相量分析 的方法对这一问题进行探讨。将判据Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ转换 为相量形式并组合作出相量图,再分析各相量大小、 相位差以及它们与励磁系统参数间的关系,即可对 励磁系统产生振荡源的原因作出解释。

对磁链  $E_q'(E_q'=x_{ad}\psi_f/x_f$ ,也可看做发电机磁链,即瞬变电动势)、磁链微分  $\dot{E}_q'$ 、机端电压 V 和励磁电压  $x_{ad}\Delta u_f/x_f$ 进行辨识,得到这几个变量在振荡模式  $\sigma+j\omega$ 下的幅值和相位,作出其相量图,如图 6 所示。



图 6 励磁系统引起负阻尼振荡的机理 Fig.6 Mechanism of negative damping oscillation induced by excitation system

图 6 以磁链相量  $\Delta \tilde{E}_{q}'$ 为参考量,  $\Delta \tilde{E}_{q}' = \Delta E_{qm}' \angle 0^{\circ}$ 。磁链微分相量  $\Delta \tilde{E}_{q}' = s \Delta \tilde{E}_{q}' = (\sigma + j\omega) \Delta \tilde{E}_{q}', s \Delta \tilde{E}_{q}'$ 超前  $\Delta \tilde{E}_{q}'$ 约 90°。作出机端电压相

量  $\Delta \tilde{V}$ ,设  $\Delta \tilde{V}$  超前  $\Delta \tilde{E}_q'$ 的角度为  $\gamma$ 。将振荡模式  $\sigma + j\omega$  代入励磁系统传递函数  $G_{ex}(s)$ ,可计算得到  $G_{ex}(\sigma + j\omega)\Delta \tilde{V}$ 。磁电压相量为:

$$\frac{x_{ad}}{x_{f}}\Delta \tilde{u}_{f} = -\frac{x_{ad}}{x_{f}}G_{ex}(\sigma + j\omega)\Delta \tilde{V} \qquad (23)$$

连接相量  $s\Delta \tilde{E}_{q}'$ 与相量  $x_{ad}\Delta \tilde{u}_{f}/x_{f}$ 。由图 5 可 知,以相量  $s\Delta \tilde{E}_{q}'$ 为起点、相量  $x_{ad}\Delta \tilde{u}_{f}/x_{f}$  为终点的 相量为 $(x_{d} - x_{d}')x_{f}\Delta \tilde{i}_{f}/(T_{d0}'x_{ad})$ 。设该相量与  $x_{ad}\Delta \tilde{u}_{f}/x_{f}$ 和  $s\Delta \tilde{E}_{q}'$ 相量间的夹角分别为 $\alpha$ 和 $\beta$ 。

将积分形式判据转换为相量形式。根据电路理 论,判据 I 为当  $\alpha > 90^{\circ}$ ,励磁系统呈现正阻尼,当  $\alpha < 90^{\circ}$ ,励磁系统呈现负阻尼;根据电路理论,判 据 II 为当  $\beta > 90^{\circ}$ ,发电机呈现正阻尼,当  $\beta < 90^{\circ}$ ,发 电机呈现负阻尼;根据电压相位与有功功率流向关 系可知,判据 III 为当  $\gamma < 0^{\circ}$ ,发电机呈现负阻尼。

由图 6 可知,当励磁放大倍数增加,或者励磁时 间常数改变致使  $G_{ex}(\sigma+j\omega)\Delta \tilde{V}$  滞后  $\Delta \tilde{V}$  的角度减 小,都将使 α 和 β 减小。如果 α 减小至 90°并进一步 减小,励磁系统呈现负阻尼。当 β 减小至 90°并进一 步减小,发电机阻尼无法吸收励磁系统注入振荡能 量,发电机呈现负阻尼。在励磁系统注入振荡能量 增加的过程中,γ 也会逐渐减小到接近甚至小于 0°, γ 的减小会加快 α 和 β 的减小。

### 5 算例与仿真

仿真在单机无穷大系统中进行,仿真模型来自 于文献[15],未使用调速系统,发电机阻尼 D=0。 励磁系统为 BPA 提供的 EA 模型,其参数为  $T_R=$ 0.05, $T_A=0.055$ , $T_{A1}=0$ , $V_{RMAX MULT}=-1$ , $K_E=0$ ,  $T_E=0.36$ , $S_{E.75MAX}=0.094$ , $S_{EMAX}=0.241$ , $E_{FDMIN}=$ -3.5, $E_{FDMAX}=3.5$ , $K_F=0.125$ , $T_F=1.8$ 。通过改 变调压器增益  $K_A$ 来改变系统的阻尼,其数值依次 为  $K_A=0$ (无励磁控制), $K_A=10$ , $K_A=30$ , $K_A=$ 70。

以短时故障激发系统振荡,读取励磁电压、励磁 电流、机端电压、发电机磁链  $E_q'$ ,用数值方法计算 得到磁链微分  $\dot{E}_q'$ 。在线性振荡阶段,用 TLS-Esprit 程序辨识得到以上 5 个变量的幅值和相位。 令相量  $\tilde{E}_q'=1\angle 0^\circ$ ,以其为参考重新计算其余各相 量相位和幅值,再作出相量图进行分析,如图 7 所示。

当励磁电压恒定,励磁系统向发电机中注入的 振荡能量为零。此时系统阻尼比为 $\zeta = 0.024$ 。  $K_A = 10$ 时, $\alpha > 90^\circ$ ,励磁系统呈现正阻尼,相对于 无励磁控制,系统阻尼比有所增加, $\zeta = 0.027$ 。  $K_A = 30$ 时,励磁系统放大倍数的增加使励磁电压 相量和励磁电流相量间的夹角  $\alpha$ 减小到 73°,励磁 系统呈现负阻尼,系统阻尼比降至 $\zeta = 0.017$ 。 $K_A =$ 70时励磁放大倍数的增加最终使得  $\alpha$  和  $\beta$  均小于 90°,励磁系统注入的振荡能量无法被发电机完全吸 收,系统阻尼比  $\zeta = -0.000$  05。

![](_page_4_Figure_2.jpeg)

在仿真中磁链  $E_q'$ 是直接读取的。在实际应用 中  $E_q'$ 无法直接测量,需要通过重构得到。更好的 选择是根据式(20)和式(21)计算磁链微分  $\dot{\phi}_i$ ,进而 计算  $\dot{E}_q'$ ,再根据  $s\Delta \tilde{E}_q'$ 与  $\Delta \tilde{E}_q'$ 之间的关系作出相 量图。

本文方法可以方便地对励磁系统的负阻尼进行 分析,并判断是否由于励磁参数不当造成了负阻尼。 计算励磁系统注入振荡能量即可判断某一台发电机 的励磁系统是不是产生了负阻尼;分析励磁电压相 量、磁链微分相量、机端电压间的相位和幅值关系即 可解释励磁系统为什么产生了负阻尼。进行以上分 析只需要励磁电压、励磁电流、机端电压以及励磁系 统传递函数,不需要全系统状态方程。这里所分析 的励磁系统负阻尼机理分析方法针对的是励磁系统 造成振荡最简单的一种情况,多机电力系统中励磁 系统负阻尼能量机理可能涉及多个控制器间的相互 作用,这仍然是一个需要深入探讨的问题。本文的 工作为进一步的研究提供一个理想的框架。

#### 6 结语

本文在能量法的基础之上提出等效电路分析方法,以探讨自由振荡的负阻尼能量机理。在分析系统能量结构基础之上,对每一个部分建立等效电路。将各部分电路组合,得到系统等效电路。提出了相量形式的振荡源定位方法。

在对励磁系统振荡源进行定位的基础上分析了 励磁负阻尼能量机理。由于励磁放大倍数增大导致 励磁电压相量、励磁电流相量以及磁链微分相量之 间的夹角发生变化,进而改变励磁系统的阻尼大小 和正负。

从励磁系统的负阻尼机理可看出,控制系统是

否成为振荡源与振荡模式有关。若某个振荡模式未 被激发,就不能从测量信号中判断出控制器对该模 式的阻尼作用。不能保证发现所有潜在振荡源,这 是用实测信号分析控制器阻尼作用的一个局限性。

在分析励磁系统负阻尼机理的时候用到了频率 响应法。对于已知数学模型但未建立能量函数模型 的元件,可以根据其传递函数的频率响应进行分析。

下一步工作首先是对励磁系统负阻尼能量机理 作更深入的分析,特别需要研究等效电路参数变化 引起励磁系统负阻尼的机理。本文提出的相量分析 法是一种非常有用的分析工具,下一步也将尝试将 其用于分析电力系统稳定器(PSS)参数错误引发的 低频振荡。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

## 参考文献

- [1] 刘取.电力系统稳定性及发电机励磁控制[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 肖鸣,梁志飞,南方电网强迫功率振荡事故分析及其处置措施
  [J].南方电网技术,2012,6(2):51-54.
  XIAO Ming, LIANG Zhifei. Analysis on the forced oscillation failure in China Southern Power Grid and its handling measures
  [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 51-54.
- [3] 余一平,闵勇,陈磊,等.基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J].电力系统自动化,2010,34(5):1-6.
  YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Disturbance source location of forced power oscillation using energy functions[J].
  Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 1-6.
- [4] 陈磊,陈亦平,闵勇,等.基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源 定位:(二)振荡源定位方法与算例[J].电力系统自动化,2012, 36(4):1-5.
   CHEN Lei, CHEN Yiping, MIN Yong, et al. Low frequency

oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy: Part two method for oscillation source location and case studies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5.

[5] 陈磊, 闵勇, 胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位:
 (一)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3):
 22-27.

CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy: Part one mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27.

- [6] 李颖,沈沉,刘锋.基于 Hamilton 实现的电力系统振荡源设备级 定位[J].电力系统自动化,2012,36(23):6-11.
  LI Ying, SHEN Chen, LIU Feng. Oscillation source location in control devices of generators based on Hamiltonian realization
  [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 6-11.
- [7] 李颖,沈沉,刘锋.基于能量结构的电力系统振荡分析方法[J].电 力系统自动化,2013,37(13):49-56.

・学术研究・

LI Ying, SHEN Chen, LIU Feng. A methodology for power system oscillation analysis based on energy structure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 49-56.

- [8] 陈磊,闵勇,陈亦平,等.振荡能量分析和特征值分析的联系及发 电机阻尼评估[J].电力系统自动化,2013,37(19):33-40. CHEN Lei, MIN Yong, CHEN Yiping, et al. Relationship between oscillation energy analysis and eigenvalue analysis and assessment of generator damping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 33-40.
- [9] CHEN Lei, MIN Yong, CHEN Yiping, et al. Evaluation of generator damping using oscillation energy dissipation and the connection with modal analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(3): 1393-1402.
- [10] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北 京:清华大学出版社,2002.
- [11] TSOLAS N, ARAPOSTATHIS A, VARAIYA P P. A structure preserving energy function for power system transient stability analysis [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1985, 32(10): 1041-1049.
- [12] 杨毅强,刘天琪,李兴源,等.电力系统强迫功率振荡的等效电路定位分析法[J].电网技术,2012,36(11):101-108.
   YANG Yiqiang, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. An

equivalent circuit approach to locate source of power system forced power oscillation[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 101-108.

- [13] GRAHAM R. Power system oscillations [M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] 王官宏,陶向宇,李文锋,等.原动机调节系统对电力系统动态 稳定的影响[J].中国电机工程学报,2008,28(34):80-86.
  WANG Guanhong, TAO Xiangyu, LI Wenfeng, et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 80-86.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York, USA: McGraw-Hill Professional, 1994.

杨毅强(1980—),男,博士研究生,主要研究方向:电力 系统分析计算与稳定控制。E-mail: yqyang\_1992@126.com 刘天琪(1962—),女,通信作者,教授,博士生导师,主要 研究方向:电力系统分析计算与稳定控制、调度自动化及能

量管理系统等。E-mail: tqliu@sohu.com

李兴源(1945—),男,教授,博士生导师,主要研究方向: 电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电等。

(编辑 蔡静雯)

# Discussion on Energy Mechanism of Negative Damping and Oscillation Source Locating Method Based on Equivalent Circuit Method

YANG Yiqiang<sup>1,2</sup>, LIU Tianqi<sup>1</sup>, LI Xingyuan<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, ZHAO Rui<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:** In order to explain the mechanism of forming oscillation source in free oscillation, an equivalent circuit method based on the energy method is proposed. The equivalent circuits of various parts of the power system are developed, and the equivalent circuit of the system is obtained by combining them together. According to the circuit theory, an oscillation source locating criterion calculated with integral is converted into a variety of criteria represented by phasors. Three criteria are proposed for locating the oscillation source of the excitation system. By converting the three criteria into criteria represented by phasors and combining them together, the mechanism of forming oscillation source in the excitation system is analyzed. The correctness and effectiveness of the methods are verified by simulation. The methods proposed can be used to locate the oscillation source in the excitation system online and analyze the mechanism of oscillation source formed by inappropriate excitation parameter setting.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51037003).

Key words: equivalent circuit method; oscillation source locating; energy mechanism of negative damping; excitation system

![](_page_5_Picture_23.jpeg)