



# 考虑各种本地负荷的大规模DG系统的建模与同步稳定研究

武汉大学电气与自动化学院



周洪

# 目录

## CONTENTS

01

研究背景与意义

02

负载的分类及其特性

03

考虑各种本地负荷的微电网建模

04

基于Kuramoto模型的微电网的同步稳定性研究

05

总结



# 1、研究背景与意义

CPEM全国电力设备管理网  
微信公众平台: CPEM

环境污染



能源短缺



各种类型的负载



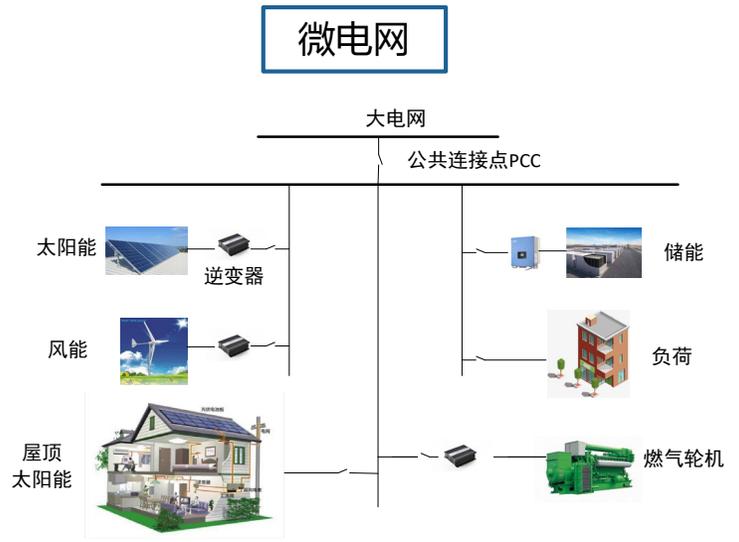
分布式发电



分布式发电  
间歇性、随机性

产消者（带有各种本地负载的可再生能源发电）

微电网



CPEM全国电力设计管理网  
微信公众号: CPEM



研究负载分类及其特性，有助于对现有的微电网模型进行改进，使模型更符合实际，更有效地模拟了微电网中发、用、储能之间的相互作用，提高模型的精度。

研究考虑各种本地负载的微电网稳定性问题。通过建模，将微电网的稳定性问题转化为Kuramoto模型的同步问题。有助于微电网的推广和发展。

CPEM全国电力设备管理网  
微信公众号：CPEM



## 2. 负载的分类及其特性

CPEM全国电力设备管理网  
微信公众号: CPEM

## ◆ 阻性负载:

阻性负载指的是通过电阻类的元件进行工作的纯阻性负载。即和电源相比，当负载电流负载电压没有相位差时，负载为阻性（如负载为白炽灯、电炉等）。

由于阻性负载电流与电压之间没有相位差，阻性负载R所消耗的视在功率、有功功率、无功功率分别为：

$$S_R = \frac{E^2}{R}$$

$$P_R = \frac{E^2}{R}$$

$$Q_R = 0$$



CPEM全国电力设备管理网  
微信公众号：CPEM

## ◆ 感性负载:

感性负载是指带有电感参数的负载。确切讲, 应该是负载电流滞后负载电压一个相位差特性的为感性负载, 如变压器, 电动机等。电感电压与电流的变化率成正比, 即

$$u = L \frac{di}{dt}$$

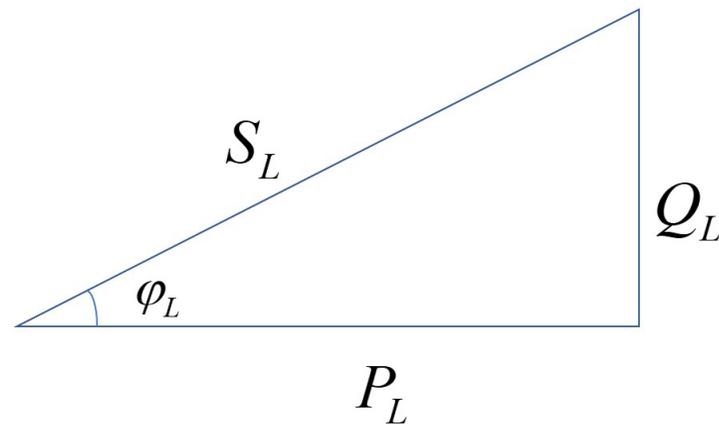
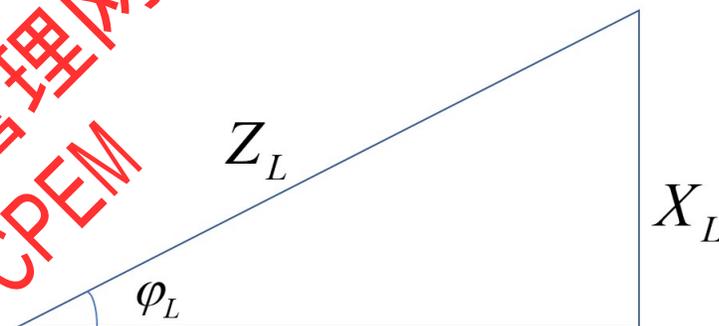
在电路中, 对电流所起的阻碍作用叫做阻抗。感性负载的阻抗为  $Z_L = R + j\omega L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{j\varphi_L}$

感性负载所消耗的视在功率、有功功率、无功功率分别为:

$$S_L = \frac{E^2}{Z_L}$$

$$P_L = \frac{E^2}{Z_L} \cos \varphi_L$$

$$Q_L = \frac{E^2}{Z_L} \sin \varphi_L$$



## ◆ 容性负载:

容性负载一般是指带电容参数的负载，即符合电流超前电压特性的负载（如补偿电容等）。

$$i = C \frac{du}{dt}$$

同理，容性负载的阻抗为

$$Z_C = R - \frac{j}{\omega C} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} e^{\varphi_C}$$

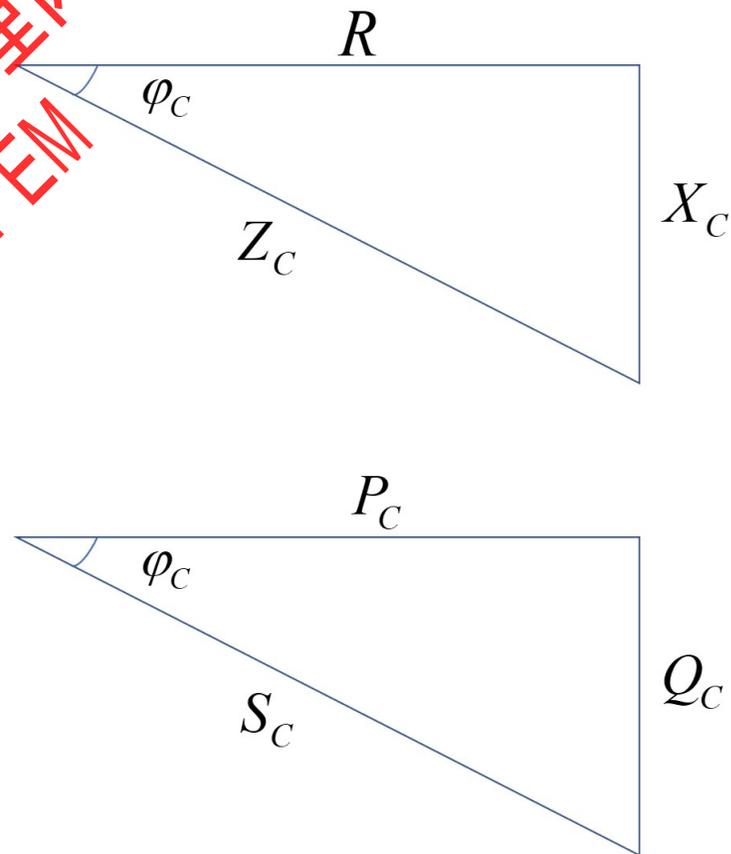
感性负载所消耗的视在功率、有功功率、无功功率

分别为:

$$S_C = \frac{E^2}{Z_C}$$

$$P_C = \frac{E^2}{Z_C} \cos \varphi_C$$

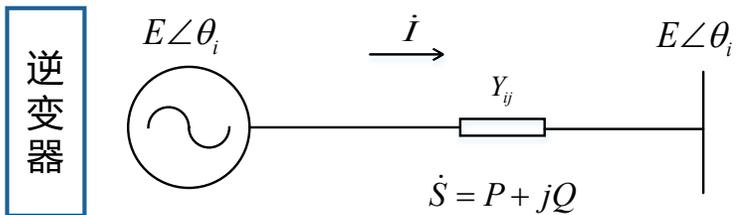
$$Q_C = \frac{E^2}{Z_C} \sin \varphi_C$$





### 3、考虑各种本地负荷 的微电网建模

CPEM全国电力设备管理网  
微信公众平台 · CPEM



输出功率

$$\dot{S}_{io} = \dot{E}_i \dot{I}_i^* = \dot{E}_i \sum_{j=1}^n \text{conj}(Y_{ij} \dot{E}_j)$$

$$P_{io} = \sum_{j=1}^n (E_i E_j g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + E_i E_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j))$$

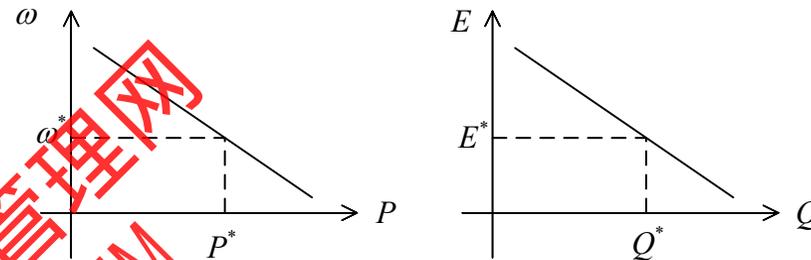
$\varphi_{ij} = \arctan(g_{ij}/b_{ij})$   
电纳引起的能量损耗

$$P_{io} = \sum_{j=1}^n E_i E_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \varphi_{ij})$$

在线路上增加LCL滤波器  
等方法来增强线路感性

$$\varphi_{ij} = 0$$

$$P_{io} = \sum_{j=1}^n E_i E_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j)$$



下垂控制

$$\begin{cases} \omega_{io} = \omega_i^* - m_i (P_{io} - P_i^*) \\ E_{io} = E_i^* - n_i (Q_{io} - Q_i^*) \end{cases}$$

$$P_{io} = \sum_{j=1}^n E_i E_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j)$$

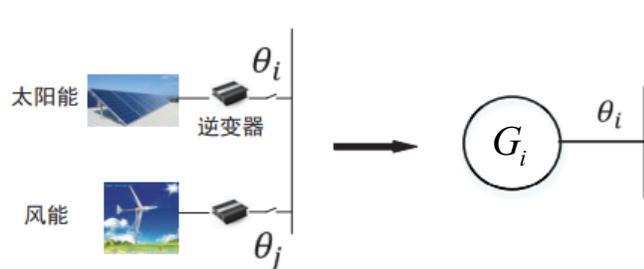
$$\dot{\theta}_i = \omega_{io} - \omega_i^* = m_i (P_i^* - P_{io}) = m_i P_i^* - \sum_{j=1}^n m_i E_i E_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j)$$

$$\omega_i = m_i P_i^*$$

$$a_{ij} = m_i E_i E_j |Y_{ij}|$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

◆ 可再生能源发电:



$$\dot{\theta}_i = \omega_{i0} - \omega_i^* = m_i(P_i^* - P_{io})$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

◆ 带有阻性本地负荷的可再生能源发电:

$$\dot{\theta}_i = m_i(P_i^* - P_{io} - P_{iR})$$

$$P_{iR} = m_i \frac{E_i^2}{R_i}$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - P_{iR}$$

◆ 带有感性本地负荷的可再生能源发电:

$$\dot{\theta}_i = m_i(P_i^* - P_{io} - P_{iL})$$

$$P_{iL} = m_i \frac{E_i^2}{Z_L} \cos \varphi_L$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - P_{iL}$$

◆ 带有容性本地负荷的可再生能源发电:

$$\dot{\theta}_i = m_i(P_i^* - P_{io} - P_{iC})$$

$$P_{iC} = m_i \frac{E_i^2}{Z_C} \cos \varphi_C$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - P_{iC}$$

◆ 带有三种负荷的可再生能源发电:

$$\dot{\theta}_i = m_i(P_i^* - P_{io} - P_{iR} - P_{iL} - P_{iC})$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - P_{iR} - P_{iL} - P_{iC}$$



## 4、基于Kuramoto模型的 的微电网同步稳定性研究

CPEM全国电力管理网  
微信公众号: CPEM

定义 1:

定义整个系统节点的相位为  $\theta(t) = (\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_N(t))$ 。

(1) 称整个系统渐近达到锁相状态, 若相对相位差收敛为某个常数, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_i(t) - \theta_j(t)) = \delta, \forall i \neq j$$

(2) 称整个系统渐近达到相位同步状态, 若相对相位差收敛为0, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_i(t) - \theta_j(t)) = 0, \forall i \neq j$$

定义 2:

为了描述整个系统的同步程度, 定义序参量  $re^{i\psi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j}$

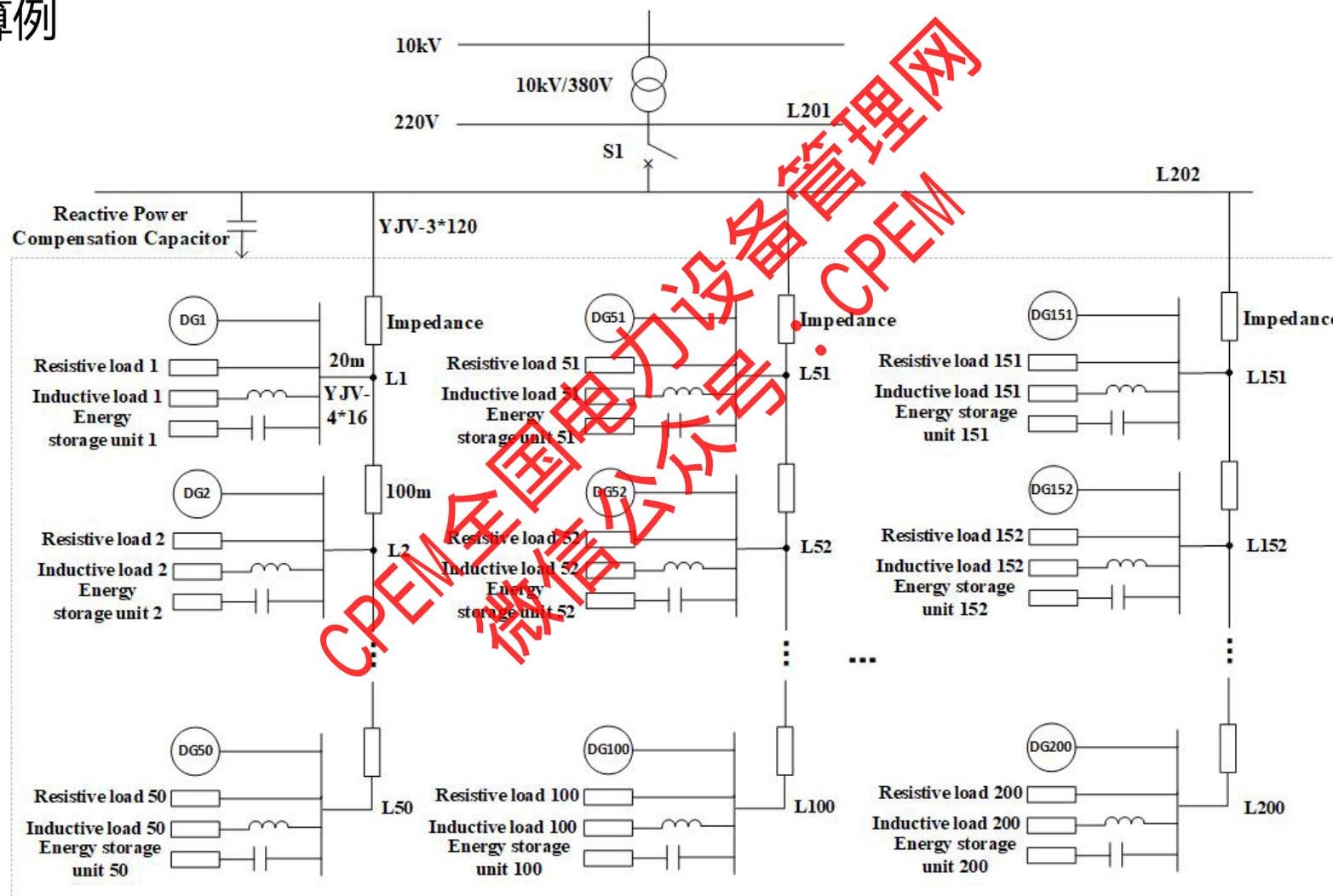
式中,  $\psi$  为整个系统节点的平均相位。且  $0 \leq r \leq 1$ 。

当  $r = 0$  时, 整个系统处于完全不同步状态; 当  $r = 1$ , 所有节点的相位完全相同。因此可以根据  $r$  的大小来判断整个系统节点相位的同步程度。

## 同步系统的稳定频率分析

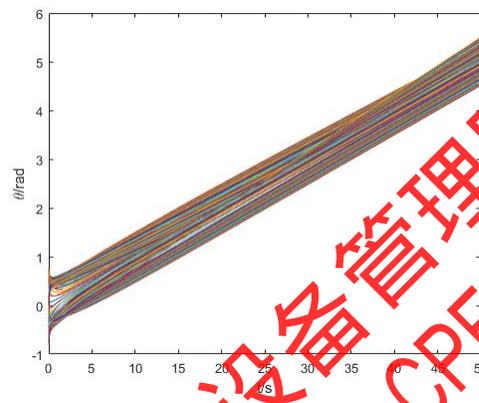
分布式发电系统	稳定频率
无负载的分布式发电	$\Omega = \sum_{i=1}^N \omega_i / N$
带阻性负载的分布式发电	$\Omega_R = \sum_{i=1}^N (\omega_i - P_{iR}) / N$
带感性负载的分布式发电	$\Omega_L = \sum_{i=1}^N (\omega_i - P_{iL}) / N$
带容性负载的分布式发电	$\Omega_C = \sum_{i=1}^N (\omega_i - P_{iC}) / N$
带三种负载的分布式发电	$\Omega_T = \sum_{i=1}^N (\omega_i - P_{iR} - P_{iL} - P_{iC}) / N$

微电网算例

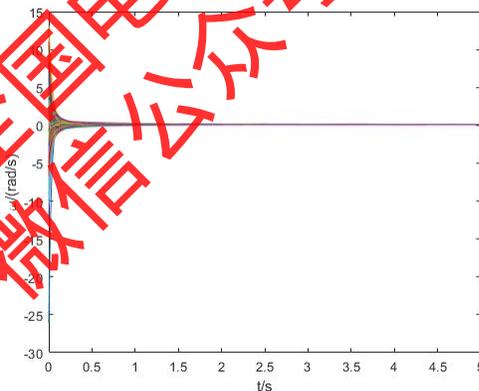


## 无负载的分布式发电仿真

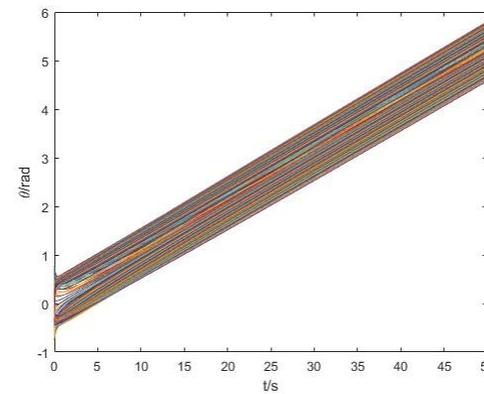
	$P_i = 0.2$	$P_i$ 为 (0,0.2) 之间的随机分布
稳定频率	0.2000	0.1034
同步时间	1.1962	1.1585



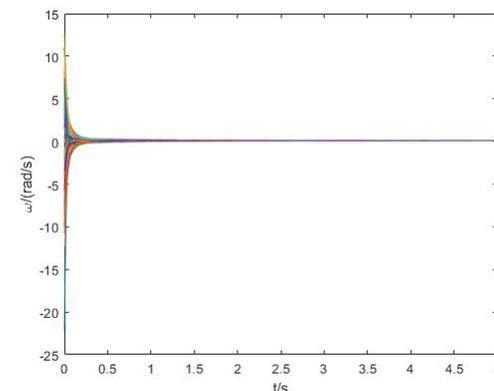
(a)  $P_i = 0.2$  时的相位稳定过程



(b)  $P_i = 0.2$  时的频率稳定过程



(c)  $P_i$  为 (0,0.2) 之间的随机分布时的相位稳定过程

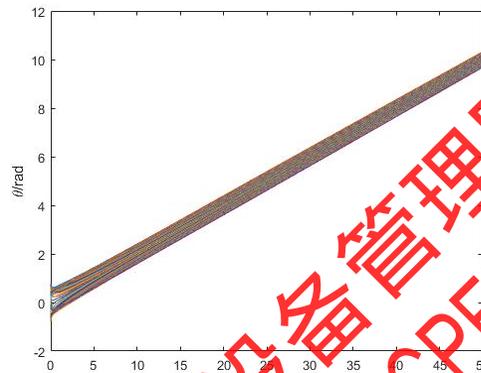


(d)  $P_i$  为 (0,0.2) 之间的随机分布时的相位稳定过程

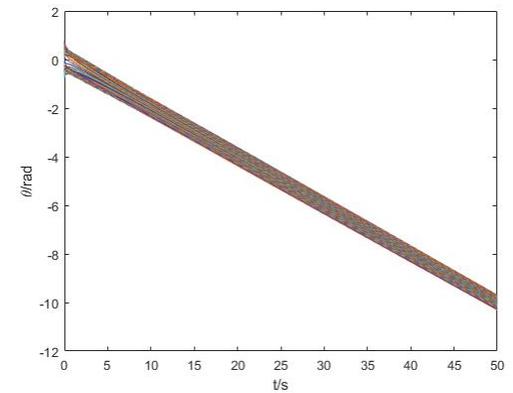
CPEM 全国电力设备管理网  
微信公众账号: CPEM

## 带阻性负载的分布式发电仿真

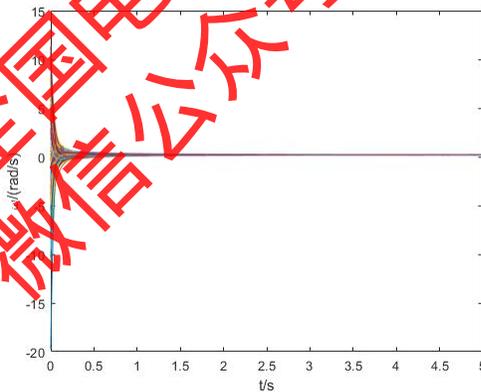
	$P_{iR} = 0.1$	$P_{iR} = 0.4$
稳定频率	0.1000	-0.2000
同步时间	1.2109	1.1537



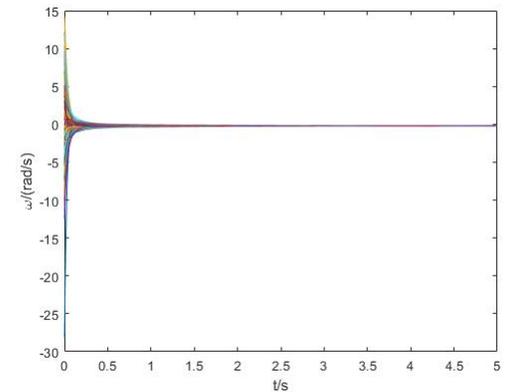
(a)  $P_{iR} = 0.1$  时的相位稳定过程



(c)  $P_{iR} = 0.4$  时的相位稳定过程



(b)  $P_{iR} = 0.1$  时的频率稳定过程

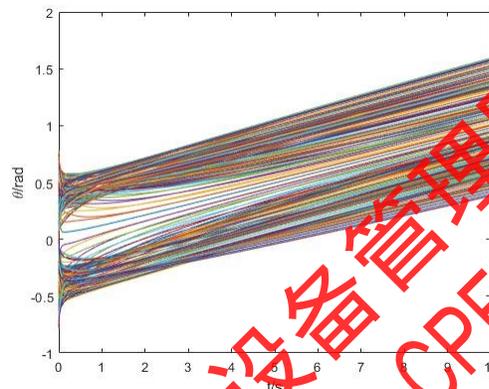


(d)  $P_{iR} = 0.4$  时的频率稳定过程

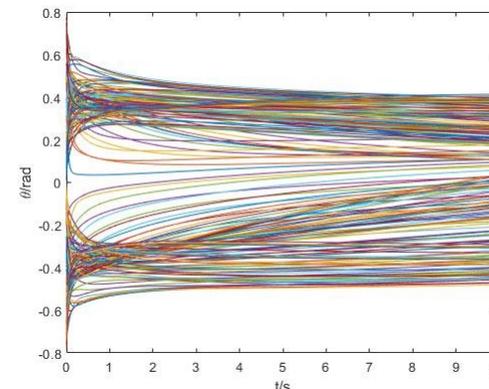
CPEM 全国电力设备管理网  
CPEM 微信公众号

## 带感性负载的分布式发电仿真

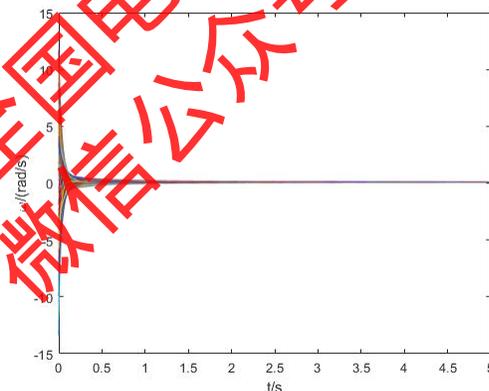
	$P_{iL}$ 为 (0,0.2) 之间的随机分布	$P_{iL}$ 为 (0,0.4) 之间的随机分布
稳定频率	0.0995	-0.0101
同步时间	1.3603	1.1282



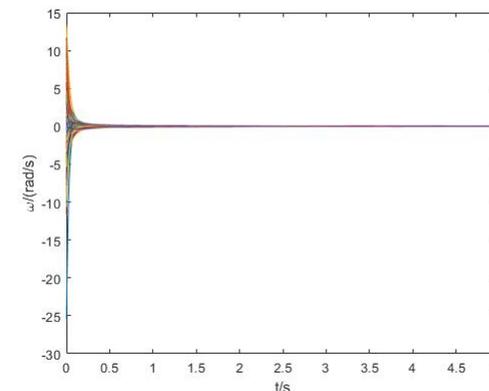
(a)  $P_{iL}$  为 (0,0.2) 之间的随机分布时的相位稳定过程



(c)  $P_{iL}$  为 (0,0.4) 之间的随机分布时的相位稳定过程



(b)  $P_{iL}$  为 (0,0.2) 之间的随机分布时的相位稳定过程

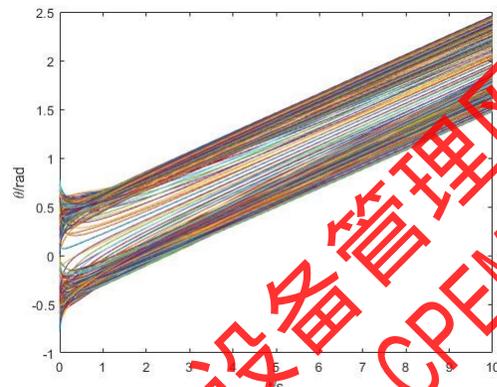


(d)  $P_{iL}$  为 (0,0.4) 之间的随机分布时的相位稳定过程

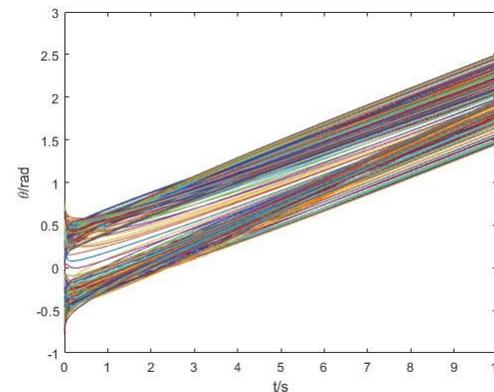
CPEM 全国电力设备管理网  
微信公众号: CPEM

## 带容性负载的分布式发电仿真

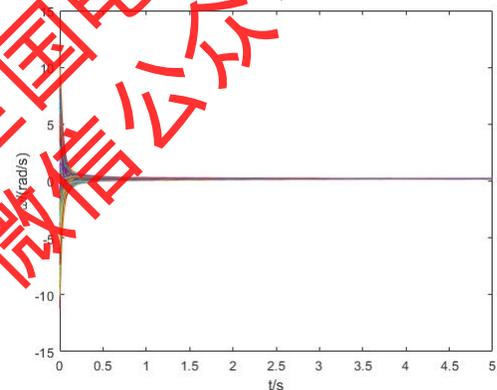
	$P_{ic}$ 为(-0.1,0.1) 之间的随机分布	$P_{ic}$ 为(-0.2,0.2) 之间的随机分布
稳定频率	0.2002	0.2003
同步时间	1.1647	1.4895



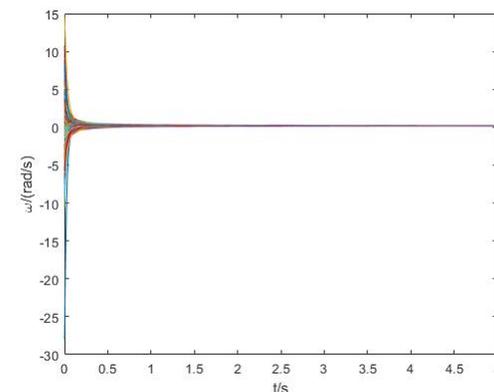
(a)  $P_{ic}$  为(-0.1,0.1)之间的随机分布时的相位稳定过程



(c)  $P_{ic}$  为(-0.2,0.2)之间的随机分布时的相位稳定过程



(b)  $P_{ic}$  为(-0.1,0.1)之间的随机分布时的相位稳定过程

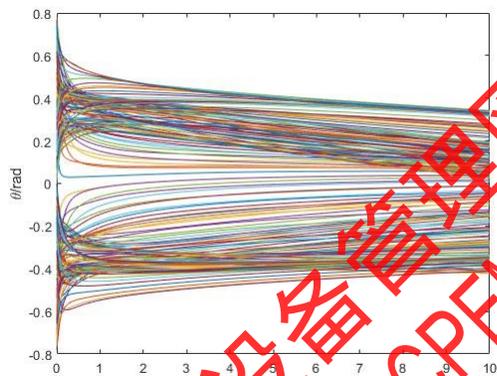


(d)  $P_{ic}$  为(-0.2,0.2)之间的随机分布时的相位稳定过程

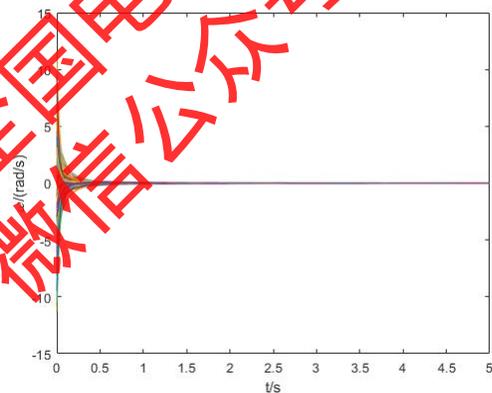
CPEM 全国电力设备管理网 微信公众号: CPEM

## 带三种负载的分布式发电仿真

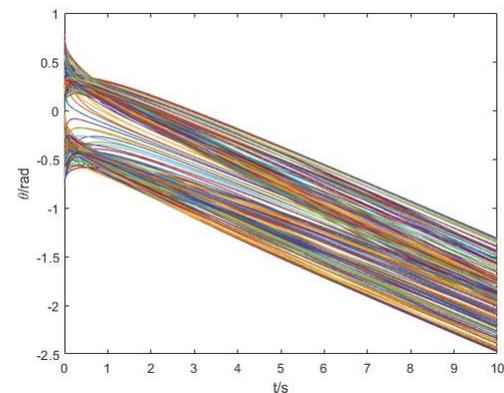
	$P_{iR} = P_{iL} = 0.2$	$P_{iR}, P_{iL}$ 为 (0,0.4) 之间的随机分布
	$P_{iC}$ 为 (-0.1,0.1)	$P_{iC}$ 为 (-0.1,0.1) 之间的随机分布
稳定频率	-0.0044	-0.1936
同步时间	1.5304	1.5087



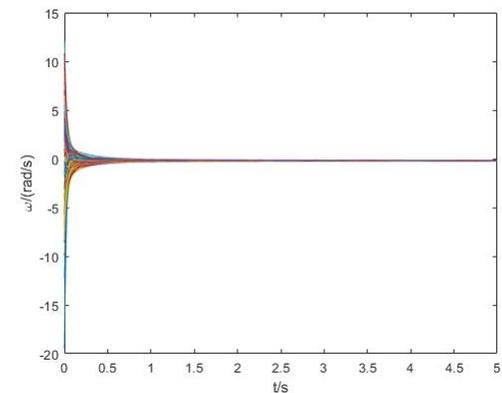
(a)  $P_{iR} = P_{iL} = 0.2, P_{iC}$  为 (-0.1,0.1) 之间的随机分布时的相位稳定过程



(c)  $P_{iR} = P_{iL} = 0.2, P_{iC}$  为 (-0.1,0.1) 之间的随机分布时的频率稳定过程



(c)  $P_{iR}, P_{iL}, P_{iC}$  分别为 (0,0.4), (0,0.4), (-0.1,0.1) 之间的随机分布时的相位稳定过程



(d)  $P_{iR}, P_{iL}, P_{iC}$  分别为 (0,0.4), (0,0.4), (-0.1,0.1) 之间的随机分布时的频率稳定过程



## 5、总结

CPEM全国电力设备管理网  
微信公众号：CPEM

一

▶ 对现实中的用电负载进行了分类，并分析了各类负载的特性。

二

▶ 建立了带各种负载的微电网的Kuramoto模型，从而将微电网的稳定性问题转化为Kuramoto模型的同步问题。

三

▶ 研究了微电网Kuramoto模型的同步稳定性，并基于一个星型拓扑和树形拓扑的微电网算例验证了模型和分析的正确性。



# 谢谢聆听

武汉大学电气与自动化学院



周洪