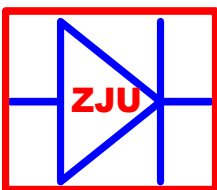




浙江大学
Zhejiang University

高比例非同步机电源电网面临的 三大技术挑战



徐政

浙江大学

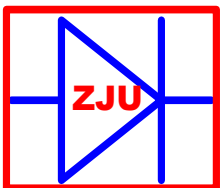
0571-87952074

www.hvdc.cn, xuzheng007@zju.edu.cn

2019年11月14日



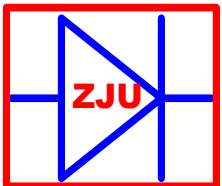
内容提要



1. 问题的提出
2. 同步稳定性的新形态-广义同步稳定性
3. 电网构造型换流器与电网电源保持同步的两种实现方式
4. 电网跟踪型换流器与电网电源保持同步的实现方式
5. 决定同步机与非同步机混合电源电网广义同步稳定性的关键因素
6. 机电暂态分析方法的不适用性与电磁暂态分析方法的全面替代
7. 由电力电子装置负电阻引起的宽频谐振不稳定及其分析方法与解决方案
8. 结论



浙江大学
Zhejiang University

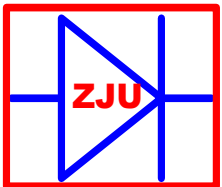


第1章

问题的提出



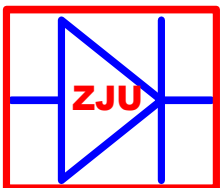
能源发展的两个50%



据相关机构测算，到2050年我国能源发展将实现“两个50%”，即在能源生产环节非化石能源占一次能源的比重超过50%；在能源消费环节电能占终端能源消费的比重超过50%。

伴随着“两个50%”的实现，同步机电源在电网中的主导地位将被打破，非同步机电源将会在电网中占非常高的比重，导致电力系统的运行特性发生本质变化。

高比例非同步机电源电网面临的 三大技术挑战



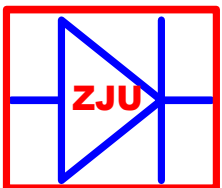
我今天的报告将探讨高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战：

- (1) 同步稳定性的新形态-广义同步稳定性；
- (2) 机电暂态分析方法的不适用性与电磁暂态分析方法的全面替代；
- (3) 由电力电子装置负电阻引起的宽频谐振不稳定问题及其分析方法与解决方案。



浙江大学

Zhejiang University

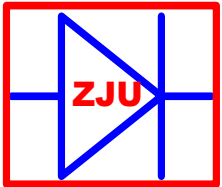


第2章

同步稳定性的新形态-广义 同步稳定性



交流电网能够运行的必要条件

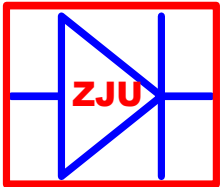


交流电网的特性要求所有电源必须是同一频率的，如果有一个电源频率不同，则必须切除此电源，否则整个交流电网不能运行，即交流电网能够运行的必要条件是所有电源必须是同一频率的。

在同步机电源占主导的交流电网中，保持所有电源为同一频率的能力被称为“同步稳定性”，具体表现为同步发电机之间的“功角稳定性”。



非同步机电源不存在固有同步能力

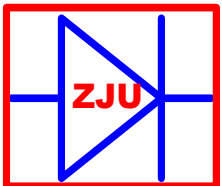


而在同步机电源与非同步机电源并存的交流电网中，保持所有电源为同一频率仍然是交流电网能够运行的必要条件。但其表现形式与同步机电源占主导的交流电网不同，同步机之间的“功角稳定性”已不足以保证同步机电源与非同步机电源之间是同频率的。

由于非同步机电源一般由电力电子换流器控制，其与电网中其他电源保持同步的能力并不是其固有的特性，而是必须由控制器来实现的，这点是与同步机本质不同的。



广义同步稳定性的定义



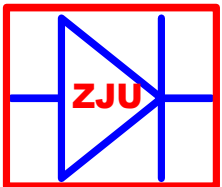
在同步机电源与非同步机电源并存的交流电网中，同步机电源之间“同步稳定性”的概念必须加以扩展以包含同步机制完全不同的所有电源之间的同频率运行条件，我们将其称为“广义同步稳定性”。

广义同步稳定性具体包括如下3个方面：

- (1) 传统的同步机之间的同步稳定性；
- (2) 同步机电源与非同步机电源之间的同步稳定性；
- (3) 非同步机电源之间的同步稳定性。



非同步机电源的两种基本型式



(1) 电网构造型 (**Grid Forming**) 换流器电源;

(2) 电网跟踪型 (**Grid Following**) 换流器电源。

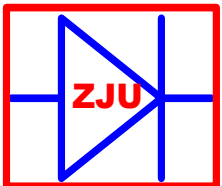
电网构造型换流器电源外部特性表现为电压源特性；典型代表是采用幅相控制（或称间接电流控制）或功率同步控制（包括虚拟同步机控制等）的电压源换流器。

电网跟踪型换流器电源的外部特性表现为电流源特性，典型代表有传统电网换相换流器（LCC）、双馈感应发电机（DFIG）以及采用直接电流控制的电压源换流器等。



浙江大学

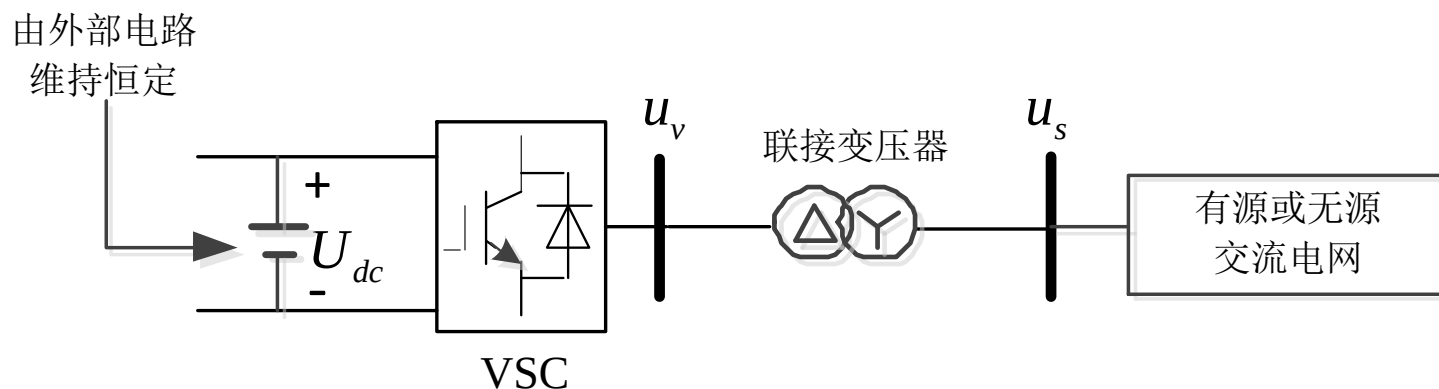
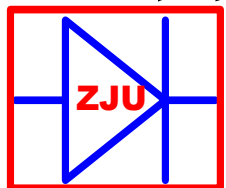
Zhejiang University



第3章

电网构造型换流器与电网电源保持同步的两种实现方式

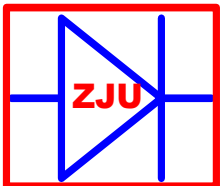
构成电网构造型换流器电源的条件



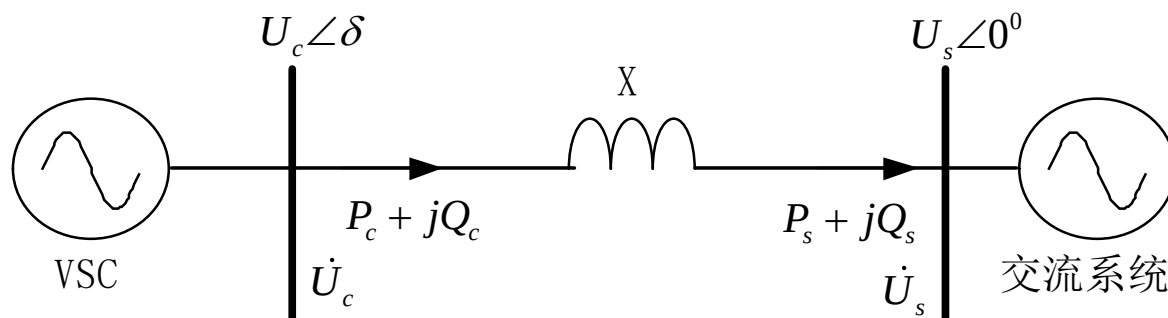
并非所有换流器都能构成电网构造型换流器电源，构成电网构造型换流器电源的一个基本条件是换流器的直流侧电压必须是能够维持恒定的，维持直流侧电压恒定的任务由其他换流器完成或者由储能装置或耗能装置完成。按照是否采用锁相环（PLL）来实现与电网电源的同步，可以将电网构造型换流器电源分为通过PLL实现同步与不通过PLL实现同步两种类型。



方式1：基于PLL实现与电网电源同步



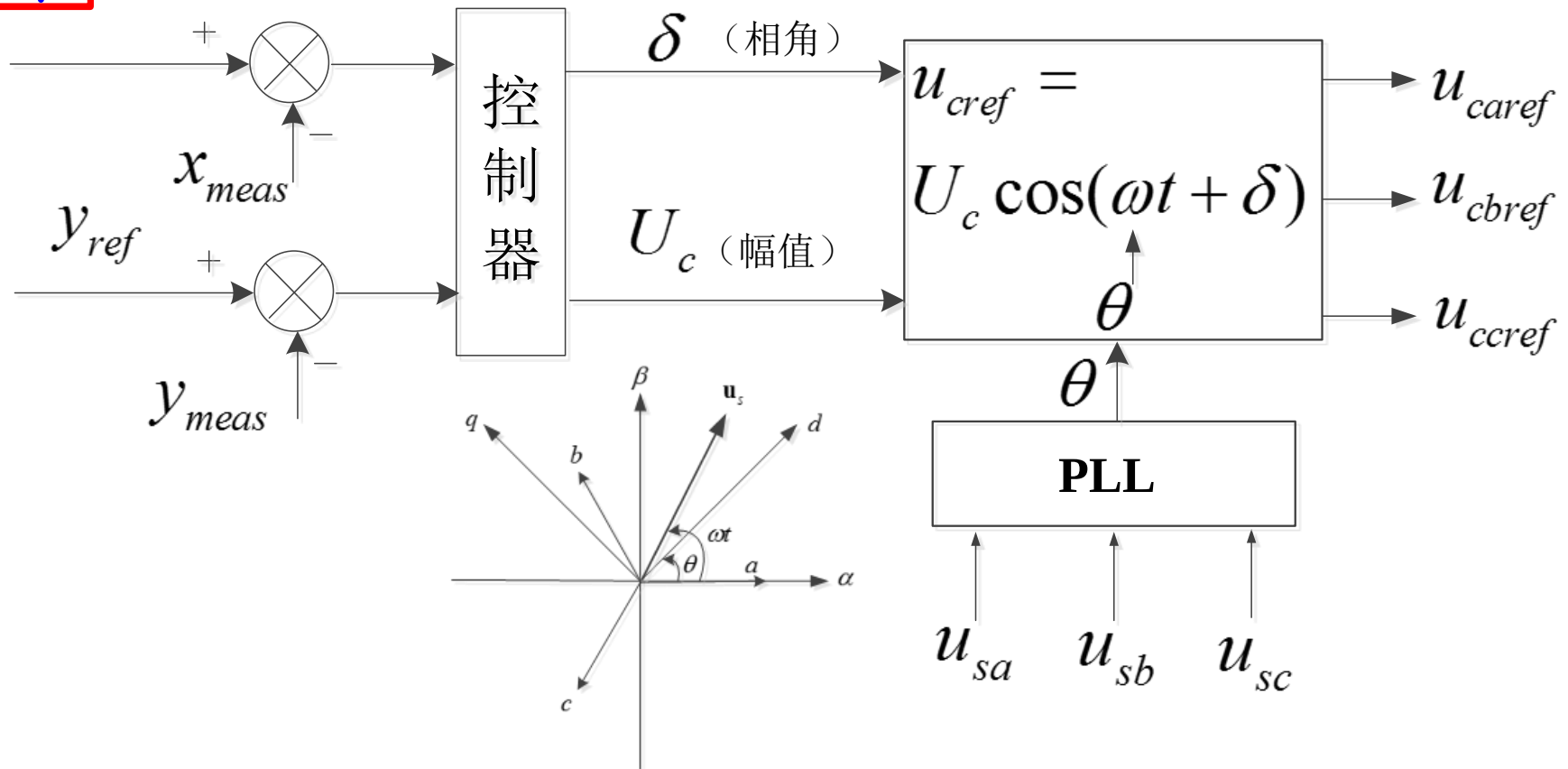
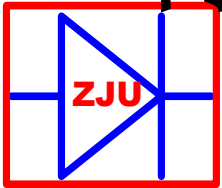
这种电网构造型换流器电源一般接入到有源交流电网中，实际上这种控制方式是电压源换流器最早采用的控制方式，被称为幅相控制或间接电流控制。



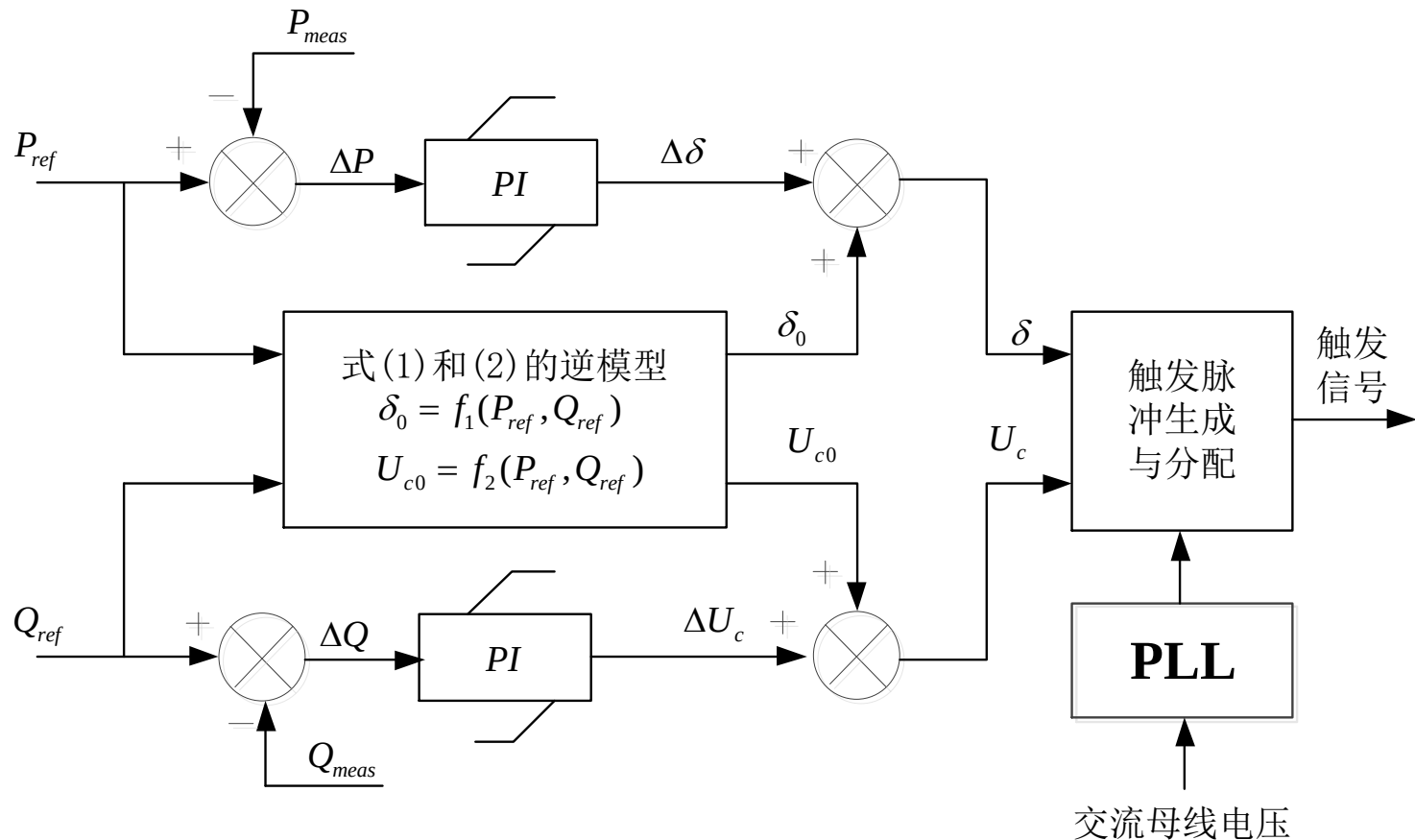
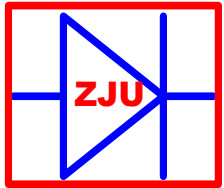
$$P_c = \frac{U_c U_s}{X} \sin \delta$$

$$Q_c = \frac{U_c (U_c - U_s \cos \delta)}{X}$$

基于PLL实现与电网电源同步的电网 构造型换流器电源一般性控制方式

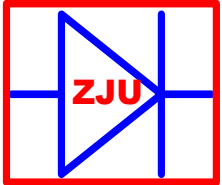


基于稳态逆模型的定有功功率和定无功功率控制框图





方式2：无PLL实现与电网电源同步

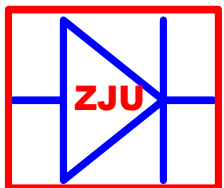


若不采用PLL来实现与电网电源的同步，则此种电网构造型换流器电源不仅可以接入到有源系统，也可以接入到无源系统。

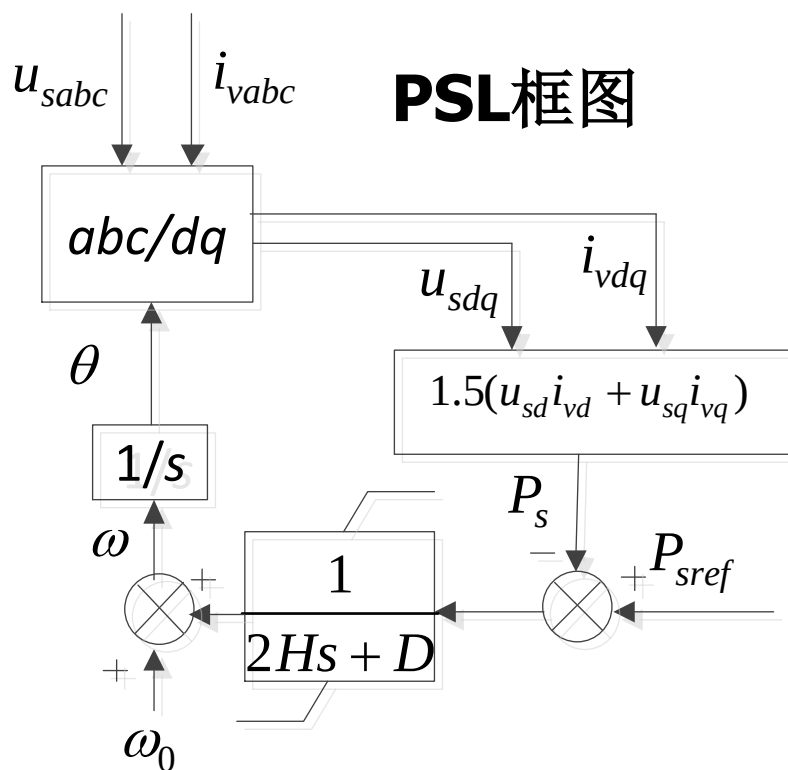
这种情况下最常见的控制方式为功率同步控制（PSC）和虚拟同步机（VSG）控制，两者本质上是一致的，下面仅仅以功率同步控制为例介绍其控制器结构。



功率同步环PSL框图



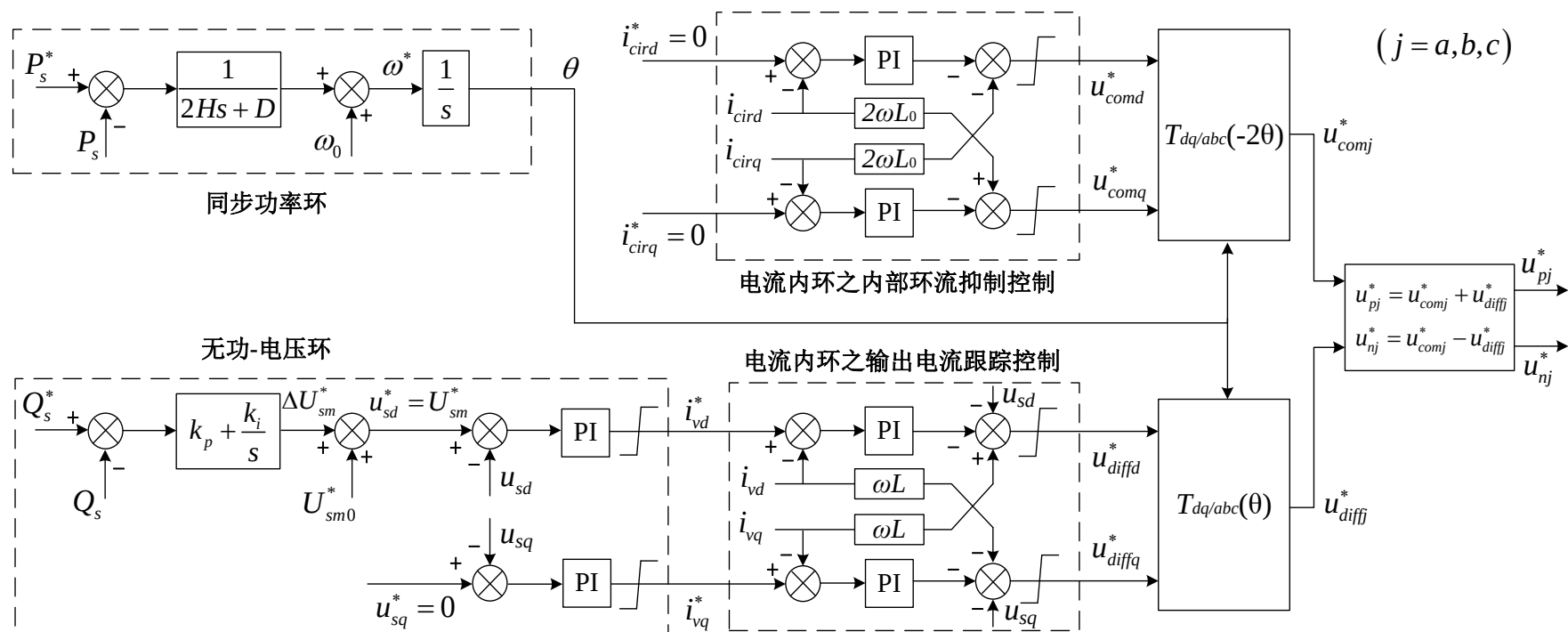
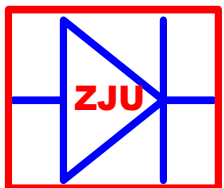
原先由PLL提供的交流母线电压 U_s 的空间旋转向量的旋转角 θ 现在由PSL提供。

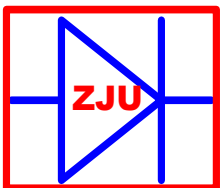


$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - P_e - D\Delta\omega$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \cdot \omega_0$$

采用功率同步控制实现的电网构造型换流器的完整框图

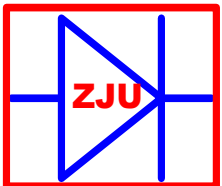




第4章

电网跟踪型换流器 与电网电源保持同步的实现方式

电网跟踪型换流器必须采用PLL与电网电源保持同步

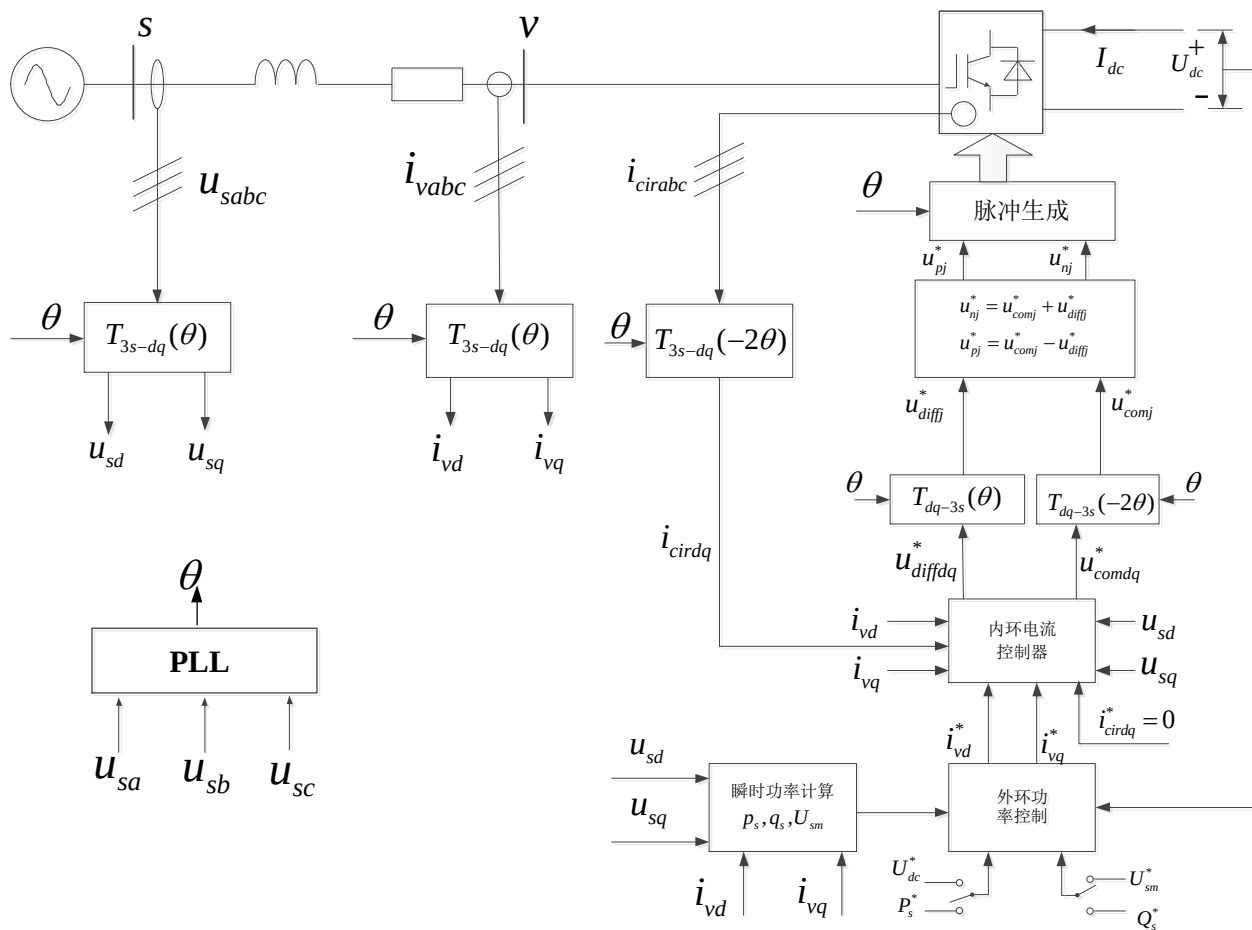
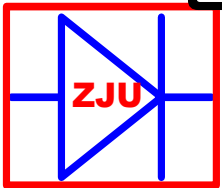


电网跟踪型换流器必须接入到有源交流电网中，其采用PLL保持与电网电源的同步。

已经投运的大多数柔性直流输电换流器都是电网跟踪型换流器。电网跟踪型换流器最常用的控制策略是直接电流控制，下面仅仅给出在同步旋转坐标系（ dq 坐标系）下采用双环控制实现的直接电流控制框图。



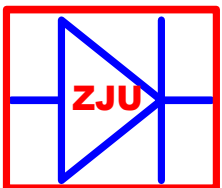
电网跟踪型VSC内外环控制器结构





浙江大学

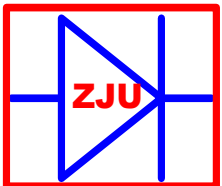
Zhejiang University



第5章

决定同步机与非同步机混合电源
电网广义同步稳定性的关键因素

PLL是决定广义同步稳定性的关键因素（1）

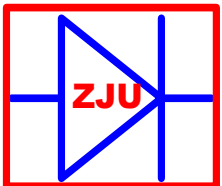


综上所述，非同步机电源实际上有3种类型，基于PLL的电网构造型换流器电源、基于PLL的电网跟踪型换流器电源和无PLL的电网构造型换流器电源。

对于无PLL的电网构造型换流器电源，比如典型的基于功率同步环PSL的功率同步控制换流器，其在启动过程中以及在交流电网发生故障而切换到限制过电流控制模式时，通常仍然会将控制模式切换到基于PLL的直接电流控制。

因此，对于非同步机电源，决定广义同步稳定性的关键因素是锁相环PLL。

PLL是决定广义同步稳定性的关键因素（2）



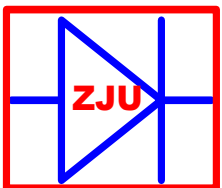
PLL失锁就意味着该换流器电源与电网中的其他电源失步，由此产生的现象就是失步振荡。根据以往纯同步机电网中失步后的故障录波图和仿真波形图可以看出，失步后电力系统就处于振荡状态，而振荡的频率范围是相当宽的。

已经发生的几次由非同步机电源主导的振荡（哈密7.1振荡，南网4.10振荡），尽管对其原因已有很多研究，但这些振荡是由PLL失锁而引起的可能性也是很大的。



浙江大学

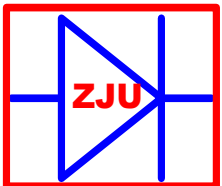
Zhejiang University



第6章

机电暂态分析方法的不适用性与 电磁暂态分析方法的全面替代

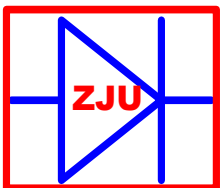
电力系统机电暂态分析只关注能量的传递



电力系统机电暂态分析的根本目的是从电力大系统整体层面考察发电机之间的同步稳定性，其核心问题是研究发电机转子之间的摇摆过程，而决定发电机转子摇摆过程的根本因素是能量的传递。

因此在电力系统机电暂态分析时，与能量传递关系不密切的因素都可以忽略不计。

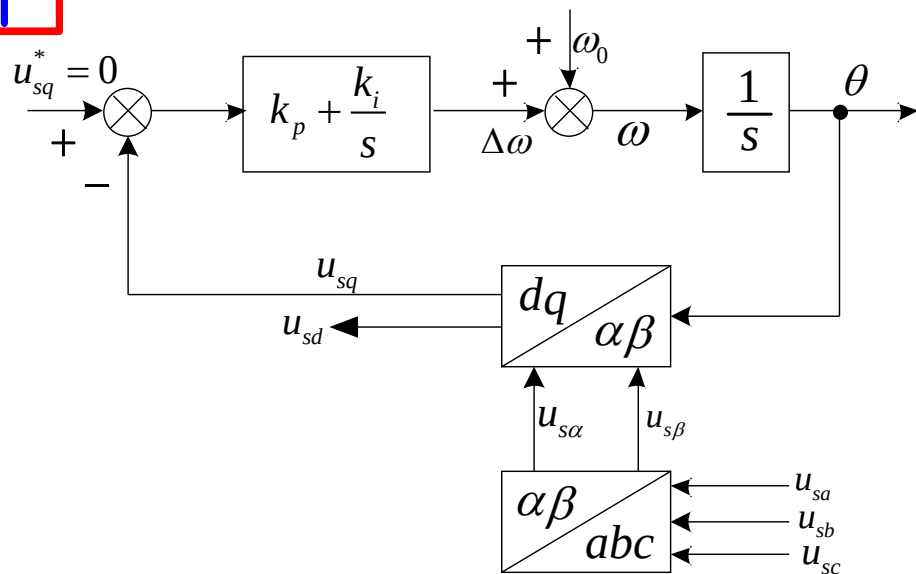
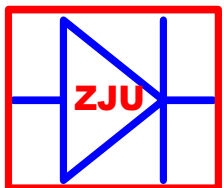
机电暂态分析中电力网络模型的三个特点



由于电力网络中的能量传递主要取决于正序基频电气量，其他非正序和非基频的电气量几乎不对能量传递造成影响。因此电力系统机电暂态分析所采用的电力网络模型有如下3个特点：

- (1) 忽略电力网络中的电磁暂态过程，只考虑电力网络中的基频电气量；
- (2) 电力网络用正序基频阻抗表示，采用代数方程描述；
- (3) 电力网络中的电气量为正序基频相量，不是瞬时值。

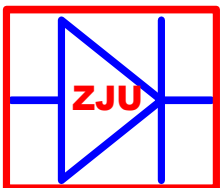
机电暂态分析方法无法模拟PLL的失锁现象



PLL是决定非同步机电源同步能力的关键因素。PLL的输入是换流站交流母线电压的瞬时值，而采用机电暂态分析方法时，只能取到换流站交流母线电压的正序相量值而无法取到其瞬时值。

因而采用机电暂态分析方法无法对PLL的行为进行准确的模拟，即无法模拟出PLL的失锁现象。这样，采用机电暂态分析方法无法对同步机电源和非同步机电源并存的交流电网的广义同步稳定性进行分析。

电磁暂态分析方法全面替代机电暂态分析方法已不可避免

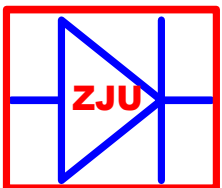


从更宏观的角度来看，对于传统同步机电源占主导的电力系统的3大计算：潮流计算、短路电流计算和暂态稳定计算，只有潮流计算还可以保持原来的方式。其他2大计算：短路电流计算和暂态稳定计算，都必须对PLL的行为进行准确模拟，因而必须取到换流站交流母线电压的瞬时值，而这只能采用电磁暂态分析方法才能实现。因此，在高比例非同步机电源交流电网中，传统的短路电流计算和暂态稳定计算已无法用机电暂态分析方法来完成，因而电磁暂态分析方法全面替代机电暂态分析方法已不可避免。



浙江大学

Zhejiang University



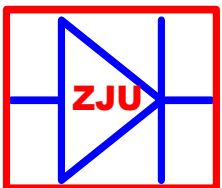
第7章

由电力电子装置负电阻引起的 宽频谐振不稳定及其分析方法 与解决方案

电力网络中以“固有谐振频率”振荡的自由分量的特性



Zhejiang University



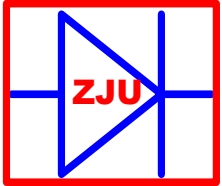
当电力系统遭受扰动后，输配电网络进入电磁暂态振荡过程，其电压、电流响应除了基波频率的强制分量外，还包含有以“固有谐振频率”振荡的自由分量。在传统的机电暂态过程分析时，此种自由分量被认为是瞬间平息的，从而忽略输配电网络的暂态过程。

由电力电子装置负电阻引起的宽频谐振稳定性就是针对上述以“固有谐振频率”振荡的自由分量而定义的。

实际上，遭受扰动后输配电网络进入电磁暂态振荡过程，其电压、电流响应中以固有谐振频率振荡的自由分量，不见得一定会衰减。



“宽频谐振稳定性” 的定义



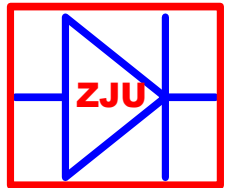
因为输配电网络所联接的电源和负荷在一定的频段内可能存在负电阻效应，典型例子是同步发电机在次同步频段会呈现出负电阻效应，而由电力电子换流器所控制的非同步机电源以及某些电力电子负荷都会有一定的频段内存在负电阻效应。

当电力网络本身的固有电阻不足以抵消电源和负荷中存在的负电阻时，电压、电流响应中以固有谐振频率振荡的自由分量不见得会衰减，又由于固有谐振频率的分布极其宽广，因此定义遭受扰动后电压、电流响应中以固有谐振频率振荡的自由分量的衰减特性为“宽频谐振稳定性”。

“宽频谐振稳定性”的分析方法



时域仿真方法研究系统稳定性的前提条件

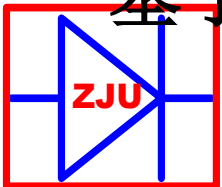


采用时域仿真方法研究系统稳定性问题实际上隐含着一个前提条件，即系统的初始运行点是一个稳定运行点，否则系统无法过渡到初始运行点。因此基于时域仿真法研究稳定性问题的一般性做法是从系统的一个稳定初始运行点开始，仿真若干时间步，然后在不同的时间点改变系统或控制器的结构和参数，考察系统的时域响应特性，特别是考察随着时间推移系统是否振荡发散或者能够过渡到新的稳定运行点，从而判定系统在经受特定扰动下的稳定性。

“宽频谐振稳定性”的分析方法



基于电磁暂态仿真方法研究宽频谐振稳定性的困难



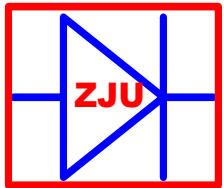
对于包含大量电力电子装置的电力系统，并不能直接判定某个初始运行点的谐振稳定性。对于初始运行点本身就谐振不稳定的系统，通过电磁暂态仿真无法建立起该系统的初始运行状态。

因此采用电磁暂态仿真方法研究宽频谐振稳定性时，只能对初始运行点是谐振稳定的系统进行研究，而不能对初始运行点本身就谐振不稳定的系统进行研究。因此，对于宽频谐振稳定性分析，需要采用其他方法。

“宽频谐振稳定性”的分析方法



状态空间模型法的特点



宽频谐振稳定性问题针对的是电力系统在某个运行点下的线性化系统，属于小信号分析的范畴。

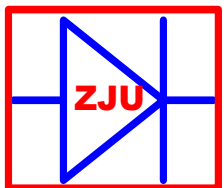
因此，所考虑的网络元件总是线性元件。当电力网络是由集总参数元件构成时，在最简单的情况下，假设元件参数都不随频率而变化，那么该电力网络可以用线性定常系统的标准状态空间模型来描述，系统的稳定性决定于状态矩阵 $\mathbf{A}$ ：（**1**） $\mathbf{A}$ 的特征值就是谐振模式；（**2**） $\mathbf{A}$ 的所有特征值就是系统的所有谐振模式；（**3**）如果 $\mathbf{A}$ 所有特征值都位于复平面的左半平面，那么该系统就是谐振稳定的。并且对于由集总参数元件构成的电力网络，其谐振模式为有限个。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{U}$$

“宽频谐振稳定性”的分析方法



采用状态空间法的三个主要困难



(1) 当考虑输电线路等分布参数元件时，因描述分布参数元件特性的方程是偏微分方程，整个电力网络已不能用线性定常系统的标准状态空间模型来描述。

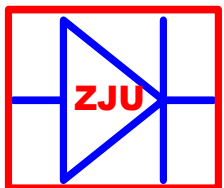
(2) 若进一步考虑元件参数随频率而变化的特性，那么即使对于由集总参数元件构成的电力网络，也无法用线性定常系统的标准状态空间模型来描述。

(3) 对于电力电子装置，建立其在某个运行点下的线性化状态空间模型并不容易。

“宽频谐振稳定性”的分析方法



s域节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}(s)$ 引入



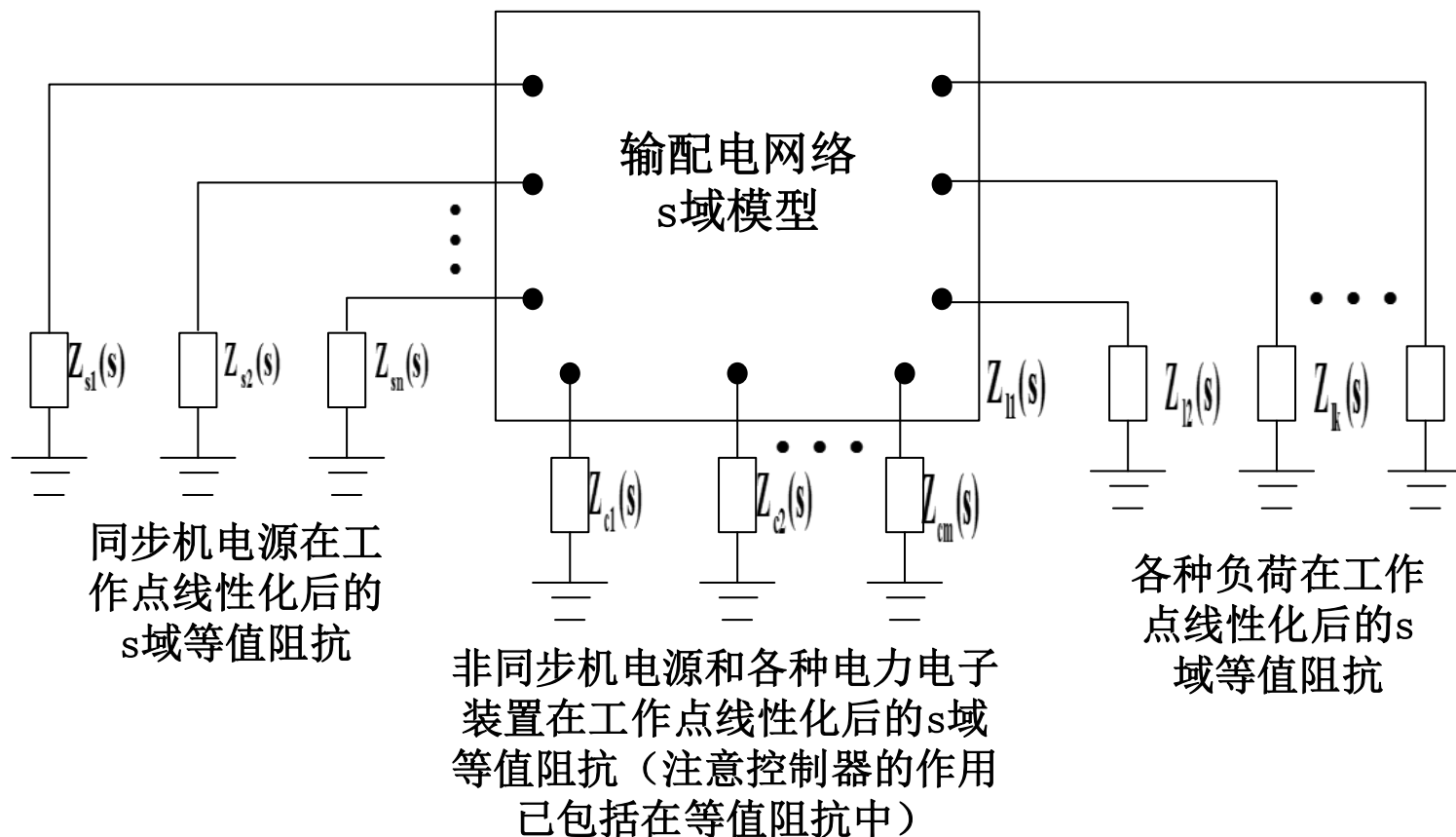
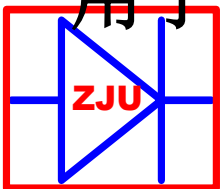
所谓的“s域节点导纳矩阵”也称为“运算导纳矩阵”。例如，电容C的运算导纳是 sC ，电感L的运算导纳是 $1/(sL)$ ；简单地说，将交流稳态分析时元件导纳模型中的 $j\omega$ 用 s 来替换就构成了对应元件的运算导纳，对于分布参数的输电线路，也有类似的结果。

在得到各元件的运算导纳模型后，构建运算导纳矩阵的步骤与交流稳态分析时构建节点导纳矩阵的步骤完全一致。对于包含分布参数元件和频变参数元件的电力系统，构建其s域节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}(s)$ 并不存在特殊困难。

“宽频谐振稳定性”的分析方法



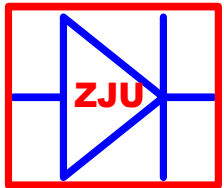
用于建立s域节点导纳矩阵的电力系统s域纯阻抗模型



“宽频谐振稳定性”的分析方法



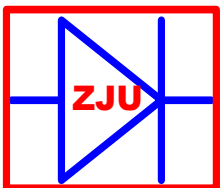
s域节点导纳矩阵法的原理



令 $\mathbf{Y}(s)$ 的行列式为 $\det[\mathbf{Y}(s)]$ ；那么 $\det[\mathbf{Y}(s)] = 0$ 的根（也称为 $\det[\mathbf{Y}(s)]$ 的零点）就是该电力系统的谐振模式， $\det[\mathbf{Y}(s)]$ 的所有零点就是该电力系统的所有谐振模式，如果 $\det[\mathbf{Y}(s)]$ 的所有零点都位于复平面的左半平面，那么该电力系统就是谐振稳定的。

求 $\det[\mathbf{Y}(s)]$ 零点的方法有多种，如Newton-Raphson法。由于包含分布参数元件的电力系统的谐振模式有无限个，因此实际工程分析时，往往在指定频段内搜索 $\det[\mathbf{Y}(s)]$ 的零点。在所分析的频段内 $\det[\mathbf{Y}(s)]$ 有多少个零点，就表示该电力系统在所分析的频段内存在多少个固有谐振模式。

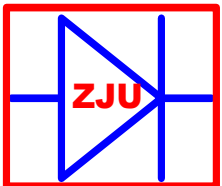
“宽频谐振稳定性”问题的解决方案



对于特定的谐振模式 s_i ， $\mathbf{Y}(s_i)$ 是一个常数矩阵，且 $\mathbf{Y}(s_i)$ 必有一个特征值 $\lambda_0 = 0$ 。求出 $\mathbf{Y}(s_i)$ 对应特征值 λ_0 的左和右 2 个特征向量，就能得到关于谐振模式 s_i 的参与因子。显然，参与因子表示了电力系统中各节点参与谐振模式 s_i 的程度，因此可用于定位电力系统中参与谐振模式 s_i 的主要区域。更进一步，通过计算谐振模式 $s_i = -\sigma_i + j\omega_i$ 关于矩阵 $\mathbf{Y}(s_i)$ 中各元素 y_{ij} 的灵敏度，可以确定哪些系统元件对谐振模式 s_i 具有主导性的影响。这样，就能确定对谐振模式 s_i 起主导性作用的“特定地点”和“特定装置”。在此基础上，存在 2 种提高谐振模式 s_i 阻尼的控制策略。一种策略是改变电力系统中既有元件的阻抗频率特性，如采用虚拟阻抗控制；另一种策略是加装新的装置，使其呈现出要求的阻抗频率特性。



浙江大学
Zhejiang University

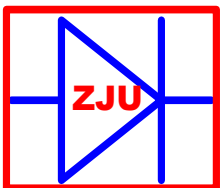


第8章

结 论



结论 (1)



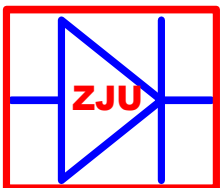
(1) 在同步机电源与非同步机电源并存的交流电网中，同步机电源之间“同步稳定性”的概念须扩展为“广义同步稳定性”的概念以包含同步机制完全不同的所有电源之间的同频率运行条件。

(2) 电网构造型换流器能够成立的必要条件是直流侧电压能够由外部电路维持恒定。

(3) 电网跟踪型换流器必须接入到有源交流电网中，且必须采用PLL保持与电网电源的同步。



结论（2）



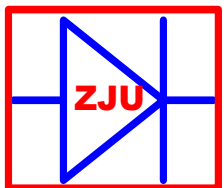
（4）在同步机电源与非同步机电源并存的交流电网中，决定广义同步稳定性的关键因素是锁相环PLL，PLL失锁就意味着该换流器电源与电网中的其他电源失步。

（5）由于机电暂态分析方法不能准确模拟PLL的失锁现象，因而不能用于分析广义同步稳定性问题，合适的做法是采用电磁暂态分析方法来进行广义同步稳定性问题的分析。

（6）遭受扰动后输配电网络会进入电磁暂态振荡过程，其电压、电流响应中以固有谐振频率振荡的自由分量，不见得一定会衰减，“宽频谐振稳定性”描述了这些以固有谐振频率振荡的自由分量的衰减特性。



结论 (3)



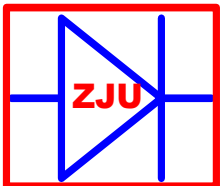
(7) 应用电磁暂态仿真方法研究宽频谐振稳定性时，只能对初始运行点是谐振稳定的系统进行研究，而不能对初始运行点本身就谐振不稳定的系统进行研究。

(8) 应用状态空间模型法研究宽频谐振稳定性时，对于分布参数元件、频变元件和电力电子装置的模拟存在困难。

(9) s 域节点导纳矩阵法用于分析和解决宽频谐振稳定性问题具有很大的优势。



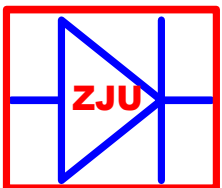
参考文献



-
- [1] 徐政著. 交直流电力系统动态行为分析（第1章）. 机械工业出版社，2004
 - [2] 徐政 等著. 柔性直流输电系统（第2版第4章）. 机械工业出版社，2017
 - [3] 张桂斌，徐政，王广柱. 基于VSC的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制. 中国电机工程学报，2002，22(1): 17-23.
 - [4] 徐政，王世佳，邢法财. 电力网络的谐振稳定性分析方法研究. 电力建设，2017，38(11): 1-8.
 - [5] 邢法财，徐政，王世佳. 非同步机电源接入电网后的谐振问题分析及抑制. 电力系统自动化，2019，43(15): 71-79.



浙江大学
Zhejiang University



THANK YOU!