

构网型变流器并网系统在强弱电网下的分岔分析

洪镇堃, 占 萌

(华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室
电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 构网型变流器并网系统在强弱电网下均存在稳定性问题, 但这 2 类稳定性问题之间的联系并不清晰。为此, 基于分岔理论揭示了这 2 类稳定性问题之间的非线性动力学关系和过渡过程的物理图像。首先根据所建模型, 对这 2 类稳定性问题的动力学响应进行分岔分析, 得出系统在弱电网下会发生鞍结点分岔, 在强电网下会依次发生霍普夫分岔、倍周期分岔并通向混沌。其次基于时间尺度理论进行模型降阶, 然后通过小扰动和大扰动分析确定端电压控制是导致强弱电网下系统动力学行为差异的关键因素。之后运用复转矩法进一步揭示了端电压控制会导致系统在强弱电网下分别因阻尼转矩不足和同步转矩不足而失稳。最后通过多机仿真证实了多机系统也存在类似的强电网失稳问题。

关键词: 构网型变流器; 电网强度; 端电压控制; 分岔分析; 复转矩法

中图分类号: TM46

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202308015

0 引言

为了减少化石能源燃烧所带来的温室效应, 以火电为代表的传统电力系统占比将逐步减少, 风电、光伏发电等新能源将大量引入^[1]。新能源、先进输电技术、多功能负荷和储能装置的大力发展使得原电力系统在“源-网-荷-储”侧增加了大量电力电子装置, 其中电压源型变流器(voltage source converter, VSC)是电力电子装置中最为常见的设备^[2-3]。在这个过程中, 以同步机为主的传统电力系统正在向高比例新能源高比例电力电子设备的新型电力系统转型, 而电力电子装备固有的低抗扰性、弱支撑性、强非线性对电力电子化电力系统的安全稳定运行带来了极大挑战^[4-7]。

相比于传统的同步机和跟网型变流器的并网特性, 构网型变流器虽然在弱电网下具有较好的稳定性^[8-10], 但并不意味着其在各种工况下均不存在稳定性问题。文献[11]指出在电网电压骤降扰动下, 构网型变流器系统会出现 2 种类型的失稳: 一种类型为故障后工作点到达了小信号不稳定的区域; 另一种类型为在故障后的工作点是小信号稳定的前提下, 故障中功角的超调量过大导致系统越过不稳定工作点而失去稳定。文献[12]发现随着电网强度的减小, 虚拟同步机(virtual synchronous generator,

VSG)的谐振峰向低频带移动, 导致系统低频振荡的风险增大。并且在这个过程中, VSG 的同步能力也会随着电网强度的减小而减弱, VSG 的动态频率偏差增大, 恢复基频的速度减慢。此外有些研究发现构网型变流器还存在强电网失稳的现象^[13-14]。文献[15]指出在强电网下构网型变流器并入电网存在 2 个电压源直接并联的风险。文献[16]基于一定的假设, 发现跟网型变流器和构网型变流器结构存在对偶性, 并基于这种对偶性理论给出了构网型变流器在强电网下失稳的解释。文献[17]通过构造 Hefron-Phillips 模型, 发现强电网下除同步环节外的系统其他动态部分引入的负阻尼会增大, 从而加剧系统的振荡。这些问题导致构网型变流器在与其他设备互联时彼此之间无法很好地合作。在实际工程中, 当连接大电源或者大容量负荷时电网强度会在较大范围内波动, 因此在强电网和弱电网中都需要具有较高适应性的构网型变流器^[18]。

目前的研究基本都是将弱电网和强电网 2 种特定工况分开分析, 对构网型变流器接入电网的失稳形态与失稳机理缺乏整体性的认识。而分岔分析可以用于系统性地研究电力系统可能存在的各种小扰动失稳和大扰动失稳的模式, 并揭示不同失稳模式之间的关联^[19-20]。因此本文基于构网型变流器单机无穷大系统, 从分岔的视角全面分析了这 2 种工况的失稳形态, 并建立起了它们之间的非线性动力学关系和过渡过程的物理图像。首先建立构网型变流器单机无穷大系统的非线性模型, 然后基于该数学模型下的系统响应分别研究在电网强度突增和电网强度骤降 2 种扰动工况进行非线性分岔分析, 建立了这 2 种工况之间的非线性动力学关系和过渡过程的物理图像。之后基于这 2 类稳定性问题所在的时

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-07-31

在线出版日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金资助项目(U22B6008); 国家自然科学基金面上项目(12075091)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China and the Enterprises Innovation Development Collaboration Foundation(U22B6008) and the General Project of National Natural Science Foundation of China(12075091)

间尺度确定主导环节,将原始模型降阶为包含端电压环节和功率同步环节的四阶模型。通过对比含端电压外环的四阶模型和只含同步环节的二阶模型的小扰动稳定性和大扰动稳定性,分析外环对强弱电网下系统动力学行为为差异的影响,并通过复转矩分析进一步揭示了强弱电网下系统失稳的本质机理。最后,通过多机仿真证实了在多机系统下也存在类似单机系统的失稳现象。

1 构网型变流器单机无穷大系统的非线性模型

构网型变流器单机无穷大系统拓扑与控制结构如图1所示。图中: u_{gabc} 、 i_{gabc} 分别为电网电压、电流, u_{tabc}/u_{tdq} 和 u_{tdqref} 分别为端电压实际值和参考值, e_{abc}/e_{dq} 、 i_{abc}/i_{dq} 分别为变流器输出电压、电流(下标abc、dq分别表示在abc静止坐标系、dq旋转坐标系下的变量); u_{ref} 为端电压指令值; m 为下垂系数; ω_p 为低通滤波器的截止频率; ω_b 和 ω_{ref} 分别为额定工作频率的基准值和输出频率的参考值; ω_{psc} 为dq旋转坐标系旋转速度标么值; θ_{psc} 为dq旋转坐标系和abc静止坐标系的夹角; P 和 P_{ref} 分别为变流器输出有功功率的实际值和参考值; L_r 和 C_r 分别为滤波电感和滤波电容; L_g 为线路电感;PI₁、PI₂分别为外环电压控制和内环电流控制的比例积分(proportional integral, PI)环节控制器。变流器的直流侧与恒定电压的电容 C 相连,交流侧通过LCL型滤波器接入无穷大电网。变流器的控制部分由端电压控制、交流电流控制和功率同步控制3个环节构成,其中端电压控制通过对端电压 u_{tdq} 控制给出电流参考值 i_{dqref} 。通常为了消除派克变换所引入的交叉耦合影响,端电压控制和交流电流控制还需要加入前馈解耦环节。

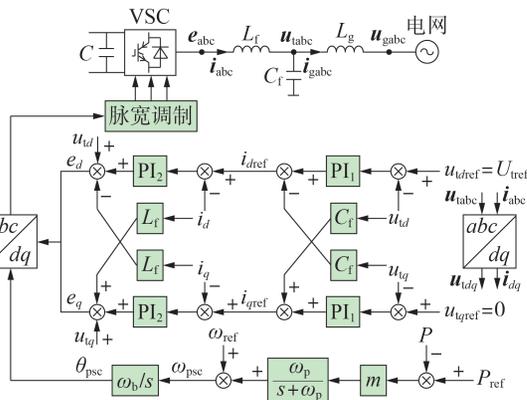


图1 构网型变换器单机无穷大系统拓扑与控制结构图

Fig.1 Topology and control structure diagram for grid-forming converter connected to single-machine infinite-bus system

abc静止坐标系、dq同步旋转坐标系和xy旋转坐标系之间位置关系以及相应的相位关系图如图2

所示。图中: U_i 和 U_g 分别为端电压和电网电压的矢量; φ 为dq同步旋转坐标系和xy旋转坐标系的夹角; θ_g 为abc静止坐标系和xy旋转坐标系的夹角; ω_g 为xy坐标系旋转速度标么值。

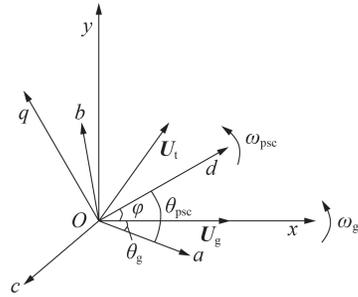


图2 abc静止坐标系、xy旋转坐标系和dq同步旋转坐标系位置关系以及相应的相位关系图

Fig.2 Reference coordinates including abc stationary frame, xy rotating frame and dq synchronous rotating frame along with angle relations

1.1 控制拓扑和系统假设

模型假设如下:①VSC的直流侧假定为一个恒压源;②变流器采用平均模型,忽略变流器损耗和线路电阻损耗。

1.2 模型构建

1) 功率同步控制。

功率同步控制可以看成是一个带低通滤波器的下垂控制,其微分方程和代数方程分别为:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \omega_r = \omega_b, \omega = \omega_b (\omega_{psc} - \omega_g) \\ \frac{d\omega_{psc}}{dt} = \omega_p (\omega_{ref} - \omega_{psc}) + m\omega_p (P_{ref} - P) \end{cases} \quad (1)$$

$$P = u_{td}i_d + u_{tq}i_q \quad (2)$$

式中: ω 为 ω_{psc} 和 ω_g 的差值; ω_r 为 ω 的有名值。

2) 端电压控制。

端电压控制包含2条支路,通过PI环节分别对 u_{td} 和 u_{tq} 进行控制。对于端电压控制环路,定义d、q支路积分器输出分别为 x_{tvc1} 和 x_{tvc2} ,则其微分方程与代数方程分别为:

$$\begin{cases} \frac{dx_{tvc1}}{dt} = k_{i1}(u_{tdref} - u_{td}) \\ \frac{dx_{tvc2}}{dt} = k_{i1}(u_{tqref} - u_{tq}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} i_{dref} = k_{p1}(u_{tdref} - u_{td}) + x_{tvc1} - C_r u_{tq} \\ i_{qref} = k_{p1}(u_{tqref} - u_{tq}) + x_{tvc2} + C_r u_{td} \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_{p1} 和 k_{i1} 分别为端电压控制中PI环节的比例系数和积分系数。

3) 交流电流控制。

同样地,交流电流控制也包含2条支路,通过PI环节分别对 i_d 和 i_q 进行控制。对于交流电流控制环

路,定义 d 、 q 支路积分器输出分别为 x_{acc1} 和 x_{acc2} ,则其微分方程与代数方程分别为:

$$\begin{cases} \frac{dx_{acc1}}{dt} = k_{i2}(i_{dref} - i_d) \\ \frac{dx_{acc2}}{dt} = k_{i2}(i_{qref} - i_q) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} e_d = k_{p2}(i_{dref} - i_d) + x_{acc1} + u_{vd} - L_f i_q \\ e_q = k_{p2}(i_{qref} - i_q) + x_{acc2} + u_{vq} + L_f i_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_{p2} 和 k_{i2} 分别为交流电流控制中PI环节的比例系数和积分系数。

4) 线路LCL型滤波动态。

线路LCL型滤波器上的电感和电容的动态可用式(7)所示微分方程组表示。

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \omega_b \omega_{psc} i_q + \frac{\omega_b}{L_f} (e_d - u_{vd}) \\ \frac{di_q}{dt} = -\omega_b \omega_{psc} i_d + \frac{\omega_b}{L_f} (e_q - u_{vq}) \\ \frac{du_{vd}}{dt} = \omega_b \omega_{psc} u_{vq} + \frac{\omega_b}{C_f} (i_d - i_{gd}) \\ \frac{du_{vq}}{dt} = -\omega_b \omega_{psc} u_{vd} + \frac{\omega_b}{C_f} (i_q - i_{gq}) \\ \frac{di_{gd}}{dt} = \omega_b \omega_{psc} i_{gq} + \frac{\omega_b}{L_g} (u_{vd} - u_{gd}) \\ \frac{di_{gq}}{dt} = -\omega_b \omega_{psc} i_{gd} + \frac{\omega_b}{L_g} (u_{vq} - u_{gq}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: i_{gd} 、 i_{gq} 和 u_{gd} 、 u_{gq} 分别为电网电流和电网电压的 d 、 q 轴分量,可表示成式(8)所示形式。

$$\begin{cases} u_{gd} = U_g \cos(\theta_g - \theta_{psc}) = U_g \cos \varphi \\ u_{gq} = U_g \sin(\theta_g - \theta_{psc}) = -U_g \sin \varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_g 为电网电压幅值。综上,通过以上建模得到了构网型变流器并网系统完整的非线性模型。

2 强弱电网下构网型变流器单机无穷大系统的分岔分析

通常电网强度用短路比(short circuit ratio, SCR)来度量,记为 ξ_{SCR} ,其表达式如下:

$$\xi_{SCR} = \frac{U_b^2}{Z_g S_b} \approx \frac{1}{L_g} \quad (9)$$

式中: U_b 和 S_b 分别为VSC输出端口的额定电压和额定功率; Z_g 为线路阻抗。一般 ξ_{SCR} 越小说明电网强度越低,当 $\xi_{SCR} > 3$ p.u.时,对应的交流电网为强电网;当 $\xi_{SCR} \leq 3$ p.u.时,对应的交流电网为弱电网。

为了分析构网型变流器单机无穷大系统在弱电网和强电网下的非线性动力学特性,设置电网强度突增和骤降2种工况。模型参数取值见附录A表A1。

2.1 构网型变流器单机无穷大系统的电网强度突增工况

设定系统的起始状态为 $\xi_{SCR} = 3.5$ p.u.,通过6种不同幅度的电网强度突增案例来观察强电网下构网型变流器单机无穷大系统的动力学行为。案例1—6为当 $t=1$ s时发生线路故障,电网强度由3.5 p.u.分别增至3.6 p.u.、3.9 p.u.、4.2 p.u.、4.292 p.u.、4.3 p.u.、4.35 p.u.。

电网强度突增下 φ 的响应曲线如图3所示。由图可知:构网型变流器单机无穷大系统在电网强度突增工况下的动力学特性表现为7种失稳形态,即多摆收敛稳定、单峰振荡失稳、双峰振荡失稳、四峰振荡失稳、多峰振荡失稳、非周期性振荡失稳及多摆发散失稳。各失稳形态所对应的电网强度和动力学行为描述如附录A表A2所示。

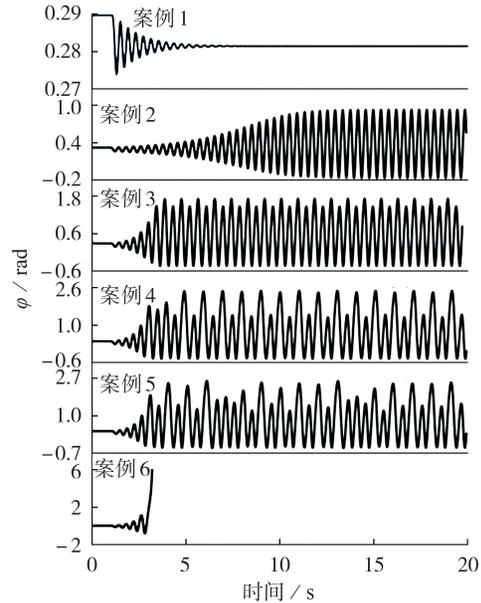


图3 ξ_{SCR} 突增下 φ 的响应曲线
Fig.3 Response curves for φ when ξ_{SCR} suddenly increases

电网强度突增工况下的相平面轨迹见图4。由图可知上述过程经历了3个典型分岔点:霍普夫分岔→倍周期分岔→混沌吸引子破裂。结合图3、4可以得到强电网下构网型变流器单机无穷大系统的分岔行为变化全过程,如附录A图A1所示。

2.2 构网型变流器单机无穷大系统的电网强度骤降工况

同样地,设定系统的起始状态为 $\xi_{SCR} = 3.5$ p.u.,通过4种不同深度的电网强度跌落案例来观察弱电网下构网型变流器单机无穷大系统的动力学行为。案例7—10为当 $t=1$ s时发生线路故障,电网强度由3.5 p.u.分别降至3.0 p.u.、2.5 p.u.、1.5 p.u.、0.5 p.u.。

电网强度骤降下 φ 的响应曲线如附录B图B1所

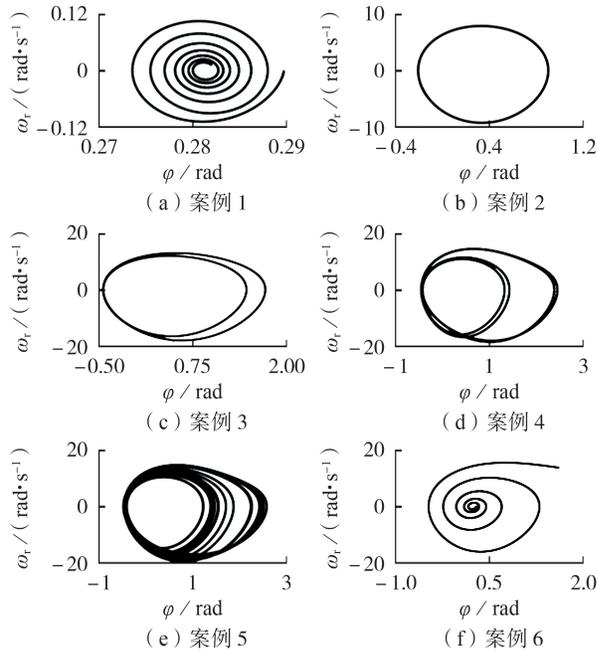


图4 电网强度突增下的相平面轨迹

Fig.4 Phase portraits when ξ_{SCR} suddenly increases

示。由图可知,随着电网强度骤降深度的增大,功率同步控制输出相位的响应曲线振荡性在减弱,而故障后输出相位的稳态值在增大,此时系统可能出现2种失稳情况:一是输出相位达到静态稳定极限,即输出功率达到极限状态,此时继续增大故障深度,输出功率将无法达到指令值,系统将失去工作点而失稳;二是随着故障深度的增大,故障后系统的稳定工作点和不稳定工作点将不断靠近,由于故障中的输出相位曲线存在一定程度的振荡,此时极有可能达到不稳定工作点导致系统直接发散失稳^[11]。附录B图B2描述了4种故障案例下的相平面轨迹,进一步验证了上述分析的准确性。

2.3 基于电网强度的分岔图

具体的分岔分析结果如图5所示,用实线表示稳定的工作点,虚线表示不稳定的工作点。随着电网强度减小,系统稳定的工作点和不稳定的工作点会相互靠近,最终在 $\xi_{SCR}=1.0$ p.u. 碰撞消失即发生鞍结点分岔,在这个过程中系统受扰极易越过不稳定工作点而失去稳定;而随着电网强度增大,系统的一对共轭特征根向右移动在 $\xi_{SCR}=3.8$ p.u. 穿越虚轴,系统发生了霍普夫分岔。进一步增大电网强度,系统

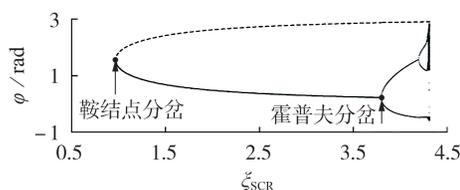


图5 ξ_{SCR} 变化时的分岔图

Fig.5 Bifurcation diagram with variation of ξ_{SCR}

将经历倍周期分岔并通向混沌,混沌吸引子不断扩大最终与不稳定的工作点碰撞而消失。以上就是构网型变流器系统从弱电网到强电网过渡过程完整的动力学行为变化物理图像。

3 强弱电网下系统动力学行为差异的本质机理

3.1 外环的影响

构网型变流器系统的稳定性主要与功率同步控制和端电压控制这2个慢尺度动态环节相关^[21]。下面将根据包含功率同步控制和端电压控制这2个环节的四阶系统来分析这2个控制环节之间的相互作用是如何导致构网型变流器系统在强弱电网下的稳定性差异。

将功率同步控制视作研究主体,端电压控制作为外环,通过忽略端电压控制动态,即认为 U_i 始终在 d 轴上且幅值恒定不变,建立只含功率同步控制的二阶模型。然后比较强弱电网下四阶模型和二阶模型的小扰动和大扰动稳定性来分析端电压控制外环的影响。四阶模型和二阶模型的控制框图见图6。

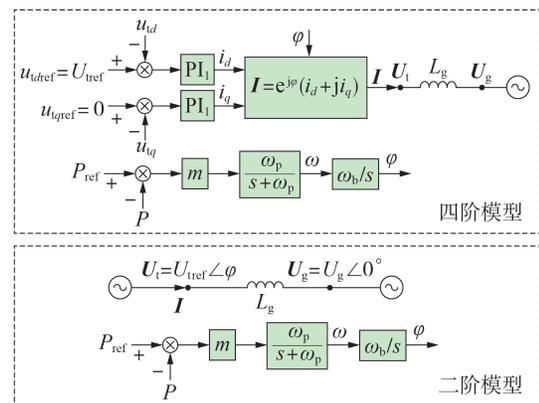


图6 四阶模型和二阶模型的控制框图

Fig.6 Control block diagram for fourth-order and second-order models

3.1.1 小扰动分析

附录C图C1为 ξ_{SCR} 从1.2 p.u.(表示弱电网)变化到4.2 p.u.(表示强电网)时四阶模型和二阶模型的特征根变化轨迹。可以看出当 ξ_{SCR} 较小时,四阶模型和二阶模型对应特征根位置相近,而随着 ξ_{SCR} 增大,四阶模型的特征根逐渐向虚轴移动并最终越过虚轴进入右半平面,二阶模型根轨迹则朝着偏离实轴的方向移动,它们的实部基本不变,此时四阶模型和二阶模型对应特征根位置逐渐偏离。

3.1.2 大扰动分析

附录C图C2表示电网强度骤降工况下和电网强度突增工况下四阶模型和二阶模型的同步输出相角 φ 的响应曲线。可以看出电网强度骤降工况下四阶模型和二阶模型的同步输出相位 φ 的响应曲线基

本一致,而在电网强度突增工况下,四阶模型的同步输出相位 φ 曲线出现单峰振荡现象,而二阶模型的同步输出相位 φ 曲线经过小幅振荡后恢复稳定,显然两者有明显的差异。

由上述小扰动和大扰动分析可知,端电压控制对强电网下系统的动力学行为影响很大,而对弱电网下系统的动力学行为影响很小。下面将进一步通过复转矩分析的方法来定量研究端电压控制对强电网下系统动力学行为的影响。

3.2 机理分析

四阶模型可进一步通过复转矩分析方法进行线性化,构建图7所示等效的Heffron-Phillips模型。图中: K 和 D 分别为功率同步控制自身固有的同步转矩和阻尼转矩系数; K_{Δ} 和 D_{Δ} 分别为端电压控制所引入的附加同步转矩和阻尼转矩系数; J 为惯性常数; ΔP 为 P 的变化量; $\Delta\omega$ 为 ω 的变化量; $\Delta\varphi$ 为 φ 的变化量。

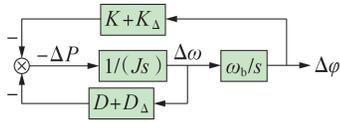


图7 等效的Heffron-Phillips模型

Fig.7 Equivalent Heffron-Phillips model

功率同步环节自身固有的同步转矩和阻尼转矩表达式为:

$$\begin{cases} K = u_{d0} U_g \cos \varphi_0 / L_g \\ D = 1/m \end{cases} \quad (10)$$

式中: φ_0 为 φ 的稳态值; u_{d0} 为 u_{d1} 的稳态值。端电压控制所引入的附加同步转矩和阻尼转矩系数表达式为:

$$\begin{cases} K_{\Delta} = \frac{\omega_d^2 U_g^2 [L_g^2 (k_{i1}^2 - k_{p1}^2 \omega_d^2) - \omega_d^2]}{L_g [L_g^2 (k_{i1}^2 - k_{p1}^2 \omega_d^2) - \omega_d^2]^2 + 4\omega_d^2 k_{p1}^2 k_{i1}^2 L_g^5} \\ D_{\Delta} = \frac{-2\omega_b \omega_d^2 U_g^2 k_{p1} k_{i1} L_g}{[L_g^2 (k_{i1}^2 - k_{p1}^2 \omega_d^2) - \omega_d^2]^2 + 4\omega_d^2 k_{p1}^2 k_{i1}^2 L_g^5} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω_d 为虚轴附近主导模态的虚部。

基于以上同步转矩和阻尼转矩的表达式, ξ_{SCR} 从1.0 p.u.变化到4.5 p.u.时,2个控制环路的同步转矩和阻尼转矩随 ξ_{SCR} 的变化曲线如图8所示。由图可知:当 $\xi_{SCR}=1.0$ p.u.时,功率同步控制固有同步转矩和端电压控制附加同步转矩都减小为0,此时系统同步转矩不足;而当 $\xi_{SCR}=3.98$ p.u.时,端电压控制引入足够大的负阻尼转矩抵消了功率同步控制的固有阻尼转矩,此时系统总的阻尼转矩不足。结合上一节的特征根轨迹分析可知:当 ξ_{SCR} 较小时,系统的同步转矩不足,导致系统出现单调失稳,而当 ξ_{SCR} 较大时,系统的阻尼转矩不足,导致系统出现振荡失稳。

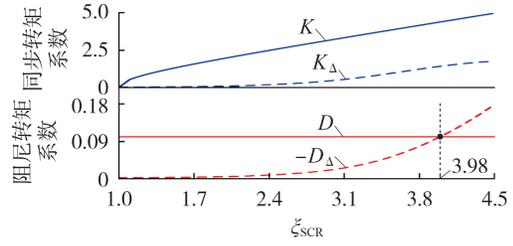


图8 同步转矩和阻尼转矩随 ξ_{SCR} 的变化关系

Fig.8 Synchronizing torque and damping torque v.s ξ_{SCR}

4 多机仿真

附录D图D1为文献[16]中14节点系统,其中同步机全部用构网型变流器和跟网型变流器替换,即100%新能源系统。图中: GFM_i ($i=1, 3, 6$)和 GFL_j ($j=2, 8$)分别表示第 i 号构网型变流器机组和第 j 号跟网型变流器。设系统起始状态即 GFM_1 和 GFL_2 之间的连接阻抗 $Z_{12_base}=0.01938+j0.05917$ p.u., GFM_1 和5号母线之间的连接阻抗 $Z_{15_base}=0.05403+j0.22304$ p.u.。通过4种不同故障深度的案例观察含构网型变流器多机系统的动力学行为。案例11—14为当 $t=3$ s时发生线路故障, Z_{12} 分别减小至 $0.6Z_{12_base}$ 、 $0.56Z_{12_base}$ 、 $0.5Z_{12_base}$ 、 $0.2Z_{12_base}$, Z_{15} 分别减小至 $0.6Z_{15_base}$ 、 $0.56Z_{15_base}$ 、 $0.5Z_{15_base}$ 、 $0.2Z_{15_base}$ 。

不同故障深度下 GFM_1 和 GFM_3 相位差如附录D图D2所示。由图可知,随着构网型变流器与其他节点之间连接阻抗的减小, GFM_1 和 GFM_3 这两台机组的相位差也依次出现单峰振荡失稳、双峰振荡失稳、非周期性振荡失稳、多摆发散失稳的现象,与单机无穷大系统出现的现象类似。这说明含构网型变流器的多机系统也会出现强电网失稳的现象。

5 结论

在构网型变流器并网系统中,随着电网强度减小,系统稳定的工作点和不稳定的工作点会相互靠近,最终碰撞消失即发生鞍结点分岔,在这个过程中系统受扰极易越过不稳定工作点而失去稳定;随着电网强度增大,系统的一对共轭特征根向右移动穿越虚轴,系统出现持续性振荡,在这个过程中依次发生霍普夫分岔、倍周期分岔并通向混沌,混沌吸引子不断扩大最终与不稳定的工作点碰撞而消失,此时系统出现多摆发散失稳。

通过小扰动和大扰动分析有力地说明了端电压控制是导致强弱电网下系统动力学行为差异的关键因素,并进一步从同步转矩和阻尼转矩的角度揭示了强弱电网下构网型变流器动力学行为差异的本质机理:在弱电网下,功率同步环节自身的固有同步转矩和端电压控制引入的附加同步转矩都很小,导致系统总的同步转矩不足,系统发生单调失稳;而在强

电网下,端电压控制引入过大的负阻尼转矩导致系统的阻尼转矩不足,此时系统发生振荡失稳。

在包含构网型变流器在内的多机系统中通过改变构网型变流器与其他机组之间的连接阻抗也能够观察到类似于单机系统中的失稳现象。此外,由于多机短路比目前还没有统一的定义,无法实时监测每台入网设备的短路比,高短路比或低短路比所带来的隐患,以及故障后短路比的波动,都将给构网型变流器所在系统的暂态稳定性带来不可忽视的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] HOLTINEN H, KIVILUOMA J, FLYNN D, et al. System impact studies for near 100% renewable energy systems dominated by inverter based variable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3249-3258.
- [2] 杨子千, 马锐, 程时杰, 等. 电力电子化电力系统稳定的问题及挑战:以暂态稳定比较为例[J]. 物理学报, 2020, 69(8): 292-305. YANG Ziqian, MA Rui, CHENG Shijie, et al. Problems and challenges of power-electronic-based power system stability: a case study of transient stability comparison[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(8): 292-305.
- [3] YANG Ziqian, ZHAN Meng, LIU Dan, et al. Small-signal synchronous stability of a new-generation power system with 100% renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems. (2022-10-14)[2023-03-23]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9919395>. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3214484.
- [4] MA Rui, LI Jinxin, KURTHS J, et al. Generalized swing equation and transient synchronous stability with PLL-based VSC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 37(2): 1428-1441.
- [5] MA R, QIU Q, KURTHS J, et al. Fast-slow-scale interaction induced parallel resonance and its suppression in voltage source converters[J]. IEEE Access, 2021, 9: 90126-90141.
- [6] MA Rui, ZHANG Yayao, YANG Ziqian, et al. Synchronization stability of power-grid-tied converters[J]. Chaos: an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2023, 33(3): 032102.
- [7] ZHANG Yayao, HAN Miao, ZHAN Meng. The concept and understanding of synchronous stability in power electronic-based power systems[J]. Energies, 2023, 16(6): 2923.
- [8] 黄林彬, 辛焕海, 鞠平, 等. 电力电子并网装备的同步稳定分析与统一同步控制结构[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 10-25. HUANG Linbin, XIN Huanhai, JU Ping, et al. Synchronization stability analysis and unified synchronization control structure of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 10-25.
- [9] 胡宇飞, 田震, 查晓明, 等. 构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 121-131. HU Yufei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Impedance stability analysis and promotion strategy of islanded microgrid dominated by grid-connected and grid-following converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 121-131.
- [10] 张国驹, 裴玮, 杨鹏, 等. 中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 18-29. ZHANG Guojun, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 18-29.
- [11] PAN Donghua, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1019-1033.
- [12] LI C, YANG Y Q, CAO Y J, et al. Frequency and voltage stability analysis of grid-forming virtual synchronous generator attached to weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2662-2671.
- [13] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [14] SUN Peng, YAO Jun, ZHAO Yang, et al. Stability assessment and damping optimization control of multiple grid-connected virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3555-3567.
- [15] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2358. ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358.
- [16] LI Y T, GU Y J, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4541-4554.
- [17] QU Z S, PENG J C H, YANG H, et al. Modeling and analysis of inner controls effects on damping and synchronizing torque components in VSG-controlled converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 488-499.
- [18] LI Ming, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on d-partition method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420-14435.
- [19] 邢光正, 吴琛, 陈磊, 等. 电压源变换器接入电网的小扰动稳定机理分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 42-49, 162. XING Guangzheng, WU Chen, CHEN Lei, et al. Analysis of small disturbance stability mechanism for grid-connected voltage source converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 42-49, 162.
- [20] 邢光正, 闵勇, 陈磊, 等. 并网VSC的大扰动失稳模式[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 47-54. XING Guangzheng, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Large-disturbance instability patterns of grid-connected VSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 47-54.
- [21] HONG Z K, XU H S, HOU Z Q, et al. Origin of anomalous instability of grid-forming converters tied to stiff grid[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(10): 2563-2574.

作者简介:

洪镇堃(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力电子电力系统并网设备的稳定性分析与控制(E-mail: zhenkun_hong@hust.edu.cn);

占萌(1974—),男,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力电子化电力系统动态、新能源并网稳定(E-mail: zhanmeng@hust.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第54页 continued on page 54)

Small disturbance modeling and stability analysis of doubly-fed wind power system considering synchronization mechanism

HAN Pingping¹, WANG Zongqiang¹, NAN Guojun¹, XIE Yuguang², LI Jinzhong², ZHANG Zhengkai³

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China;

3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: The small disturbance stability and dynamic characteristics of doubly-fed wind power system under phase locked loop synchronous mechanism and virtual synchronous generator mechanism are compared and analyzed. For the doubly-fed wind power system with the two synchronization mechanisms, the corresponding small disturbance models are obtained based on the mathematical equations, and then the small disturbance stability of the system is studied by using the eigenvalue analysis method. The relevant models are built on the StarSim-hardware-in-the-loop (StarSim-HIL) semi-physical simulation platform, and the dynamic characteristics of the active support and small disturbance stability of the doubly-fed wind power system under the two synchronization mechanisms are analyzed and verified by simulation. The applicability of the two synchronization mechanisms is summarized, and it is pointed out that the phase locked loop control has good dynamic characteristics and fast response speed, but the virtual synchronous generator control has more advantages in small disturbance stability and active power support under weak power grid.

Key words: doubly-fed wind power system; phase locked loops; virtual synchronous generator; eigenvalue; dynamic characteristic; semi-physical simulation

(上接第32页 continued from page 32)

Bifurcation analysis of grid-forming converter system connected with stiff or weak AC grids

HONG Zhenkun, ZHAN Meng

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The stability problems exist in the grid-forming converter system connected with stiff or weak grid, but their relation is unclear. The nonlinear dynamic relation between these two types of stability problems and the physical image of the transition process are revealed based on the bifurcation theory. Firstly, based on the model established, bifurcation analysis of the dynamic response between these two types of stability problems is carried out. It is found that saddle-node bifurcation occurs in weak grid, and Hopf bifurcation, period doubling bifurcation, transition to chaos, and chaos collapse occur successively in stiff grid. Next, the model is reduced based on the time scale theory. Then, by the small disturbance and large disturbance analysis, it is obtained that the terminal voltage control is the major cause of the dynamic behavior differences in stiff and weak grids. Furthermore, the complex torque is utilized to further reveal that the terminal voltage control will cause the stiff- and weak-grid instability due to insufficient damping torque and insufficient synchronizing torque, respectively. Finally, multi-machine simulations are performed to show similar instability issues in stiff grid.

Key words: grid-forming converter; grid strength; terminal voltage control; bifurcation analysis; complex torque method

附录 A

表 A1 构网型变流器单机并网系统参数

Table A1 Parameters of single grid-forming converter tied to AC system

结构	参数	参数值	结构	参数	参数值
系统参数	VSC 输出额定功率 S_b	0.2 MW	系统参数	滤波电感 L_f	0.1 p.u.
	VSC 输出端口额定电压 U_b	690 V		滤波电容 C_f	0.05 p.u.
	VSC 额定工作频率有名值 f_b	50 Hz		线路电感 L_g	0.4 p.u.
	VSC 额定工作角频率有名值 ω_b	100π rad/s		变流器输出有功功率参考值 P_{ref}	1.0 p.u.
	VSC 额定工作频率标么值 ω_{ref}	1.0 p.u.		端电压参考值 U_{tref}	1.0 p.u.
	xy 坐标系旋转速度标么值 ω_g	1.0 p.u.		电网电压 U_g	1.0 p.u.
控制器参数	下垂系数 m	$5 \times 10^{-3} S_b / \omega_b$	控制器参数	低通滤波器的截止频率 ω_p	5 rad/s
	端电压控制 PI 环节的比例系数 k_{p1}	2		端电压控制 PI 环节的积分系数 k_{i1}	100
	交流电流控制 PI 环节的比例系数 k_{p2}	1.3		交流电流控制 PI 环节的积分系数 k_{i2}	670

表 A2 构网型变流器单机无穷大系统在电网强度突增的故障下的动力学特性

Table A2 Dynamic characteristics of single grid-forming converter tied to AC system when grid strength increases

电网强度	动力学行为描述	动力学行为简称
$\zeta_{SCR} \leq 3.8$	在故障后经过多次摆动逐渐稳定	多摆收敛稳定
$3.8 < \zeta_{SCR} \leq 4.15$	在故障后经过多次摆动逐渐达到单周期的振荡失稳状态	单峰振荡失稳
$4.15 < \zeta_{SCR} \leq 4.28$	在故障后经过多次摆动逐渐达到二倍周期的振荡失稳状态	双峰振荡失稳
$4.28 < \zeta_{SCR} \leq 4.295$	在故障后经过多次摆动逐渐达到四倍周期的振荡失稳状态	四峰振荡失稳
$4.295 < \zeta_{SCR} \leq 4.298$	在故障后经过多次摆动逐渐达到 n 倍周期的振荡失稳状态 ($n=2^k, k>2$)	多峰振荡失稳 (period>4)
$4.298 < \zeta_{SCR} \leq 4.33$	在故障后经过多次摆动逐渐达到非周期的振荡失稳状态	非周期性振荡失稳 (混沌状态)
$\zeta_{SCR} > 4.33$	在故障后经过多次摆动逐渐达到单调发散失稳状态	多摆发散失稳

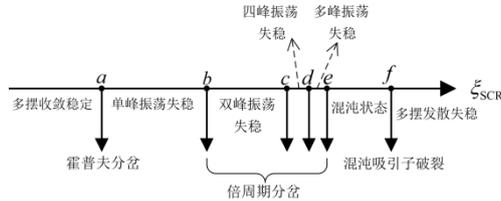


图 A1 强网下构网型变流器单机无穷大系统的分岔行为变化过程

Fig.A1 Bifurcation behavior of single grid-forming converter tied to infinite-bus system in stiff grid

图中: 点 $a \sim f$ 分别代表 $\zeta_{SCR}(i) = \{3.8 \text{ p.u.}, 4.15 \text{ p.u.}, 4.28 \text{ p.u.}, 4.295 \text{ p.u.}, 4.298 \text{ p.u.}, 4.33 \text{ p.u.}\}$, $i=1 \sim 6$ 。

附录 B

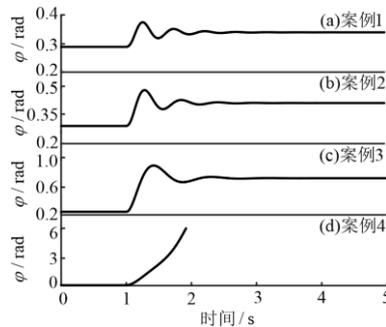


图 B1 电网强度骤降下 φ 的响应曲线

Fig.B1 Response curves for φ under ζ_{SCR} suddenly dips

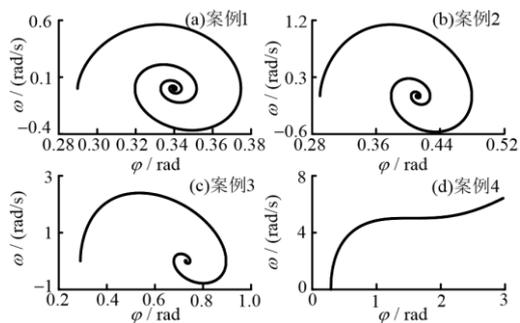


图 B2 电网强度骤降下的相平面轨迹
Fig.B2 Phase portraits under ζ_{SCR} suddenly dips

附录 C

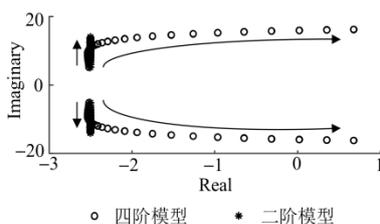


图 C1 四阶模型和二阶模型的根轨迹比较

Fig.C1 Comparison of root locus of fourth-order and second-order models

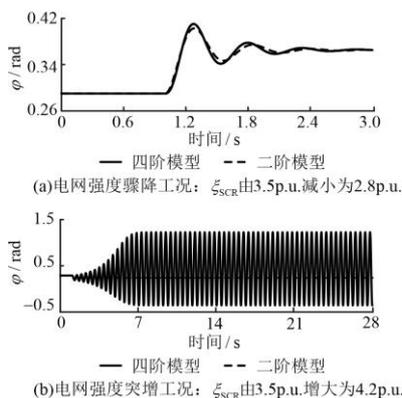


图 C2 电网强度骤降下和电网强度突增下四阶模型和二阶模型的同步输出相角 φ 的响应曲线

Fig.C2 Comparison of φ of fourth-order and second-order models under grid strength suddenly dips and suddenly increases.

附录 D

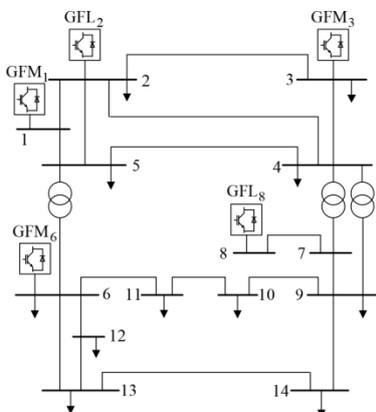


图 D1 改进的 IEEE 14-bus 系统拓扑

Fig.D1 Modified IEEE 14-bus inverter-based power system

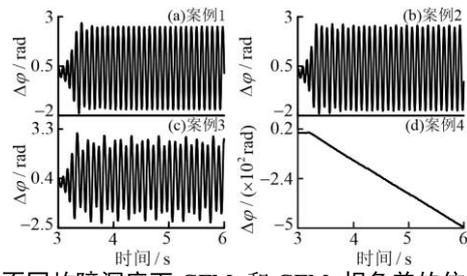


图 D2 不同故障深度下 GFM₁ 和 GFM₃ 相角差的仿真波形

Fig.D2 Simulative curves for phase difference between GFM₁ and GFM₃ under different fault depths