

含非同步机电源交流电网暂态稳定性的电磁暂态仿真研究

李晓栋, 徐政, 张哲任

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:随着非化石能源占一次能源比重和电能占终端能源比重的大幅度提升,大量非同步机电源通过电力电子换流器并网,导致同步机电源在电网中的主导地位被打破,使原本复杂的电力系统稳定性问题变得更加复杂。针对包含非同步机电源的交流电网的暂态稳定性问题,基于电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC,在2区域4机系统中,通过逐步等容量替换同步机电源,仿真研究分析了交流系统临界清除时间随非同步机电源比例、非同步机电源同步机制、非同步机电源并网位置、故障类型和故障位置5个影响因素的变化趋势。仿真结果表明,随着系统中非同步机电源占比的增加,系统的暂态稳定性逐渐增强。当系统中非同步机电源占比相同时,非同步机电源分散并网可以同时增强所在区域的暂态稳定性;在非同步机电源占主导的交流电网遭受故障时,暂态响应快,故障恢复时间短,不会表现出同步机电源的功角特性。

关键词:非同步机电源;暂态稳定性;2区域4机系统;临界清除时间;功率同步控制

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009020

0 引言

近年来,随着化石能源的日益枯竭和生态环境的日益恶化,风能、光伏等非化石能源的开发和应用得到了快速发展^[1]。截至2019年底,全球风电、光伏累计装机容量分别达到651、626 GW;我国风电、光伏累计装机容量分别达到210、204.3 GW,约占全部发电装机容量的20.52%^[2-3]。随着非化石能源占一次能源比重和电能占终端能源比重的大幅度提升^[4],大量可再生能源、高压直流输电系统、分布式电源等非同步机电源通过电力电子换流器接入交流电网中,使同步机电源在电网中的主导地位被打破,导致电力系统的运行特性发生本质变化,传统同步机之间的同步稳定性概念已不足以刻画包含非同步机电源的电网的同步稳定性问题^[5]。

非同步机电源一般可以分为电网构造型换流器和电网跟踪型换流器2种类型电源。电网构造型换流器电源与电网电源保持同步有2种基本方式:一种是采用锁相环PLL(Phase Locked Loop)跟踪换流器交流侧公共连接点PCC(Point of Common Coupling)交流母线电压的相位^[6],或作为无源网络的电源时直接给定相位角^[7];另一种是采用基于功率同步环PSL(Power Synchronization Loop)的功率同步控制PSC(Power Synchronization Control)^[8]或虚拟同步机VSG(Virtual Synchronous Generator)控制^[9-11]保持与电网电源同步。电网跟踪型换流器电源通过PLL跟踪PCC交流母线电压的相位保持与电网电源同步。

为了突出同步机制不同于同步机电源的非同步

机电源的同步稳定性特性,文献[5]提出了“广义同步稳定性”的概念,以区别于纯同步机电源电网中同步机之间的传统“同步稳定性”问题。广义同步稳定性包括同步机电源之间、同步机电源和非同步机电源之间、非同步机电源之间3个方面的同步稳定性。所谓广义同步稳定性,极重要的一部分内容是暂态稳定性问题。在传统交流电网中,当系统遭受短路故障等大扰动后,同步机电源的机械、电磁功率不匹配,各同步机电源的转子之间相对角发生摆动,依靠各自功角($P-\delta$)特性相互作用来维持功角的同步^[12-13]。而非同步机电源与同步机电源的暂态响应特性显著不同,其自身不存在 $P-\delta$ 特性,且由于受到电力电子器件过流、过压等限制,需要辅助控制(如电流限幅等)和保护装置以保证电力电子器件的安全,故含非同步机电源的现代交流电网的暂态稳定性机理更复杂。

暂态能量函数法TEF(Transient Energy Function)和时域仿真法是传统交流电网应用非常广泛和有效的暂态稳定性分析方法^[14]。相比于同步机电源,非同步机电源具有状态变量阶数高、饱和非线性、多尺度强耦合等特征,这些特征给运用TEF求解含有非同步机电源的多机系统的暂态稳定性带来了极大困难^[15]。机电暂态仿真方法采用的是正序、基波、相量模型^[12],无法模拟PLL或PSL的行为,故只有在假定PLL性能理想的条件下才能用于含非同步机电源的多机系统的暂态稳定性研究。而PLL或PSL是决定广义同步稳定性的关键因素。因此,需要采用电磁暂态分析方法全面替换机电暂态分析方法以实现对于广义同步稳定性的分析^[5]。

针对含非同步机电源的现代交流电网的暂态稳

定性问题,目前已发表文献主要基于带阻抗的理想电压源或单机无穷大系统对非同步机电源自身的暂态稳定性问题进行研究,忽略了同步机电源 $P-\delta$ 特性对暂态稳定性的影响。如:文献[8]采用相图法对基于PSC的电压源换流器VSC(Voltage Source Converter)暂态稳定性进行了研究,指出即使故障清除角超过临界清除角,经过1个振荡周期,VSC依然可以重新同步运行;文献[16]采用近似Lyapunov直接法对采用VSG控制的VSC暂态稳定性进行了研究,并提出了相应的改进策略提高VSC的暂态稳定性;文献[17-18]分析了电网遭受故障时,PLL对VSC暂态稳定性的影响,以及影响PLL响应特性的因素,并通过优化PLL控制回路参数、增加等效阻尼等措施来改善PLL响应特性和提高VSC的暂态稳定性。对于包含非同步机电源的多机系统的暂态稳定性研究的文献较少。文献[19]虽然研究了多机系统,将所有同步机电源的功角通过加权折算到系统统一惯性中心COI(Center Of Inertia),但是COI反映的是所有同步机电源组的整体同步性,忽略了各同步机电源之间的互同步性。

针对目前采用解析法求解含非同步机电源的多机系统的暂态稳定性问题非常困难的现状,本文基于电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC,在2区域4机系统中^[20],综合考虑非同步机电源的比例、同步机制、并网位置以及故障类型和故障位置等可能影响暂态稳定性的5个因素,通过等容量替换同步机电源,对不同情景进行精确仿真;然后基于仿真波形和交流系统临界清除时间CCT(Critical Clearing Time)的变化趋势,得到一些一般性、规律性的结论,为后续物理机理的分析和解释提供案例。

1 非同步机电源的同步机制

1.1 PSL

由于VSG和PSC本质是一样的,本节和后文仿真分析仅研究PSC。对于采用PSL与电网电源保持同步的非同步机电源,其失去暂态稳定性的关键因素是PSL失步。PSL的结构如图1所示。图中, $\mathbf{u}_{\text{sabc}} = [u_{\text{sa}} \ u_{\text{sb}} \ u_{\text{sc}}]^T$ 、 $\mathbf{u}_{\text{sdq}} = [u_{\text{sd}} \ u_{\text{sq}}]^T$ 分别为非同步机电源换流变压器网侧交流电压的三相瞬时值和 dq 轴分量;

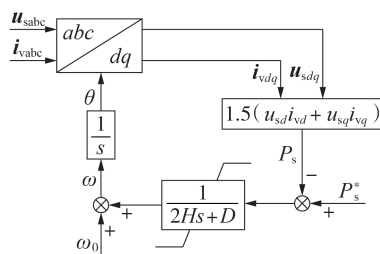


图1 PSL的控制框图

Fig.1 Control block diagram of PSL

$\mathbf{i}_{\text{vabc}} = [i_{\text{va}} \ i_{\text{vb}} \ i_{\text{vc}}]^T$ 、 $\mathbf{i}_{\text{vdq}} = [i_{\text{vd}} \ i_{\text{vq}}]^T$ 分别为非同步机电源换流变压器网侧交流电流的三相瞬时值和 dq 轴分量; ω 、 ω_0 分别为实际转速和额定转速; θ 为PCC交流母线电压的相角; H 为发电机的惯性时间常数; D 为阻尼系数; P_s^* 、 P_s 分别为非同步机电源注入交流系统的有功功率指令值和实际值。

PSL模拟同步机电源的运动方程为:

$$\begin{cases} 2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_m - P_e - D\Delta\omega \\ d\theta_c/dt = \omega\omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 为发电机转速偏差; P_m 、 P_e 分别为发电机机械功率和电磁功率; θ_c 为发电机转子电角度。PSL用 P_s^* 代替 P_m , P_s 代替 P_e , H 和 D 根据要求设定,进而得到PCC电压的相角 θ 。当PSL输出的 θ 振荡发散时,表示该非同步机电源与电网电源之间失去暂态稳定性。

1.2 PLL

对于采用PLL与电网电源保持同步的非同步机电源,其失去暂态稳定性的关键因素是PLL锁相失败。基于单同步参考系的PLL控制框图见图2,用 u_{sq} 跟踪其指令值 $u_{sq}^* = 0$,来锁住PCC电压的相角 θ 。当PLL失去稳定时就意味着PLL锁相失败,也意味着该非同步机电源与电网电源之间失去暂态稳定性。图2中, k_p 和 k_i 分别为比例系数和积分时间常数。

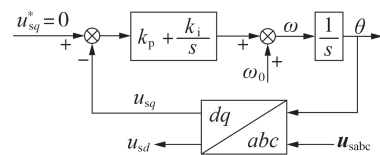


图2 基于单同步参考系的PLL控制框图

Fig.2 Control block diagram of SRF-PLL

2 含非同步机电源交流电网的暂态稳定性分析

含非同步机电源交流电网的模型用一般形式的微分-代数方程组描述为^[14]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为微分方程组描述系统动态特性的状态变量,可以是功角、频率等; $\mathbf{y}$ 为代数方程组中系统的中间输出变量; $\mathbf{u}$ 为控制量。根据动力学系统稳定性,当式(2)的解 $\mathbf{x}(t) \rightarrow \mathbf{x}_0$ 或 $\mathbf{x}_e$,即状态变量的解为系统初始平衡点或新平衡点时,表示系统是稳定的。对于含有非同步机电源的多机系统,如果考虑控制系统的动态响应等因素,人为解析式(2)将不切实际,需要借助仿真方法进行分析。

在传统交流电网中,根据稳定性定义,在系统遭受扰动后,如果式(2)的状态变量功角的解 $\delta \rightarrow \delta_e$,则说明系统是暂态稳定的。然而在含有非同步机电

表1 仿真结果
Table 1 Simulative result

情景	同步机电源	非同步机电源		故障类型	故障地点	t_{CCT}/s
		PSC	DCC			
①	1,2,3,4	/	/	F ₃	B ₃	0.079
					B ₄	0.242
					B ₅	0.047
				F ₂	B ₃	0.097
					B ₄	0.447
					B ₅	0.091
②	2,3,4	1	/	F ₃	B ₃	0.198
					B ₄	/
					B ₅	0.193
				F ₂	B ₃	0.377
					B ₄	/
					B ₅	0.298
③	3,4	1,2	/	F ₃	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	0.198
				F ₂	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	0.309
④	3,4	1	2	F ₃	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	0.186
				F ₂	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	0.289
⑤	2,3	1,4	/	F ₃	B ₃	0.198
					B ₄	/
					B ₅	0.301
				F ₂	B ₃	0.377
					B ₄	/
					B ₅	/
⑥	2,3	1	4	F ₃	B ₃	0.198
					B ₄	0.378
					B ₅	0.226
				F ₂	B ₃	0.370
					B ₄	/
					B ₅	0.306
⑦	3	1,2,4	/	F ₃	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	0.301
				F ₂	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	/
⑧	3	1,2	4	F ₃	B ₃	/
					B ₄	0.405
					B ₅	0.232
				F ₂	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	0.310
⑨	3	1	2,4	F ₃	B ₃	/
					B ₄	0.422
					B ₅	0.236
				F ₂	B ₃	/
					B ₄	/
					B ₅	0.316

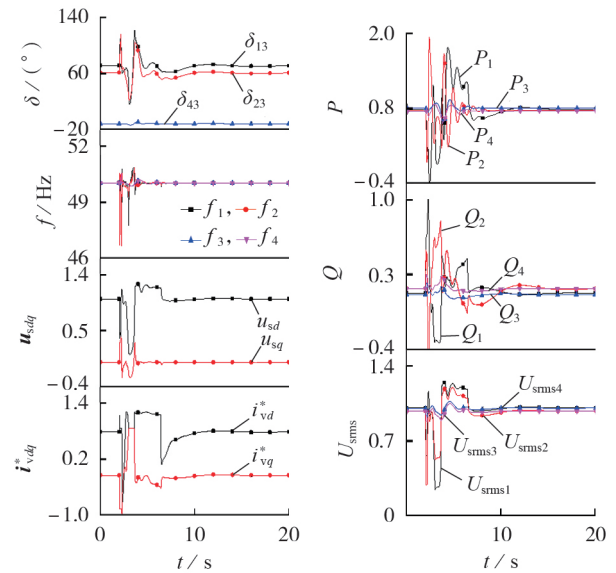
4.2 结果分析

4.2.1 非同步机电源比例

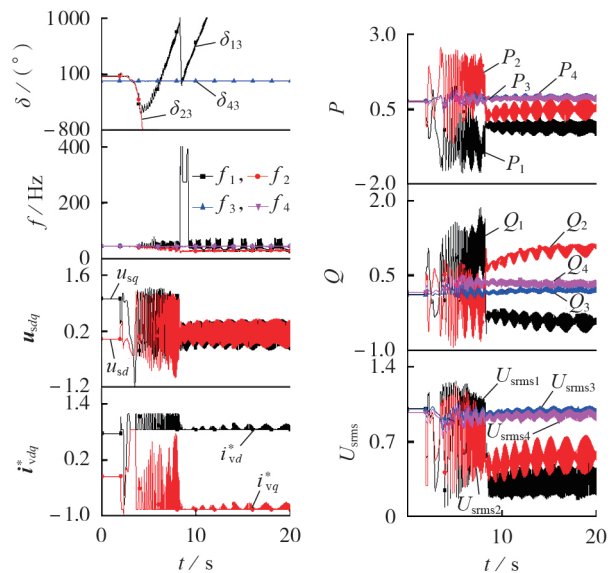
根据表1中CCT的变化趋势,随着4机系统中非

同步机电源比例的增加,系统的暂态稳定性逐步增强。在高比例非同步机电源中,基本不存在暂态稳定性问题。

情景②在B₃处的三相接地短路故障和两相接地短路故障的响应特性分别如图5和附录B中图B1所示;情景⑦在B₃、B₅处的三相短路故障响应特性分别如图6(故障持续时间为0.5 s)和附录B中图B2所示。图中, i_{vd}^* 、 i_{vq}^* 分别为非同步机电源换流变压器阀侧交流电流 d 、 q 轴分量的指令值; P 、 Q 、 U_{srms} 、 i_{vd}^* 、 i_{vq}^* 、 u_{sd} 、 u_{sq} 均为标幺值,后同。当非同步机电源占比较少时,在B₃发生故障后,由于用来替换G₁的MMC₁有功、无功出力受限,与其相近的G₂增大出力;B₁因为缺少无功支撑,故障清除后电压再次大幅度跌落,



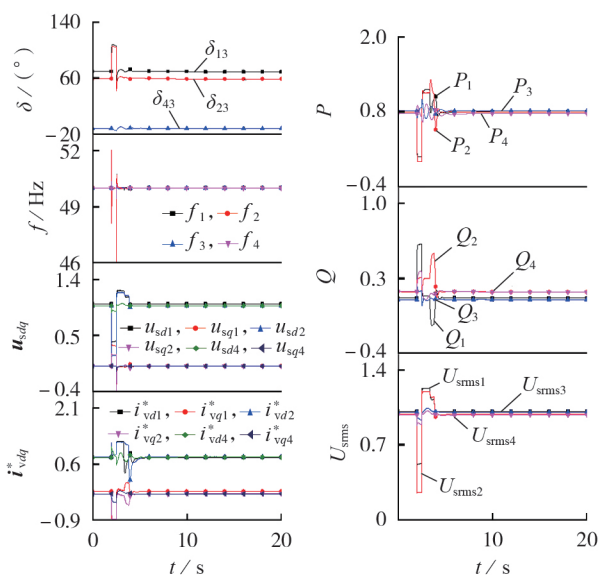
(a) 三相接地短路,故障持续时间为0.198 s



(b) 三相接地短路,故障持续时间为0.199 s

图5 情景②在B₃处的三相接地短路故障响应特性

Fig.5 Response to three-phase ground short circuit fault at B₃ of Case ②

图6 情景⑦在B₃处的三相短路故障响应特性Fig.6 Response to three-phase short circuit fault at B₃ of Case ⑦

PSL先于功角失稳;当非同步机电源占比很大时,在B₃发生故障后,系统的功角特性显著区别于只有同步机电源的传统交流电网的功角特性,完全由控制系统决定,其暂态响应快,B₁、B₂交流母线电压恢复速度极快,有功和无功可快速恢复稳定。由此可知,当非同步机电源替代同步机电源接入系统时,非同步机电源的暂态功率响应特性会影响临近同步机电源的转子转速和转子角,进而影响各电源之间的振荡。

由图5中各电源端口的频率曲线可知,在同步机电源占主导的交流电网中,在故障发生时刻,同步机电源端口频率下降幅度较大,非同步机电源端口频率波动幅度较小,远端同步机电源仅有微弱波动,故障恢复期间,非同步机电源端口的频率波动幅度较大;系统失稳后,非同步机电源端口的频率振荡发散,意味着PSL失步。由图6和图B2中各电源端口的频率曲线可知,在非同步机电源占主导的交流电网中,在非同步机电源近端发生故障后,非同步机电源端口的频率波动幅度较大;在同步机电源近端发生故障后,同步机电源端口的频率波动幅度较大,时间长,系统失稳后,同步机电源端口的频率发散下跌。

4.2.2 非同步机电源并网位置

由表1中情景③和情景⑤可知,相比于2组非同步机电源集中接入区域1,2组非同步机电源分散接入区域1和区域2,可以同时提高2个区域近端故障的暂态稳定性。

4.2.3 非同步机电源同步机制

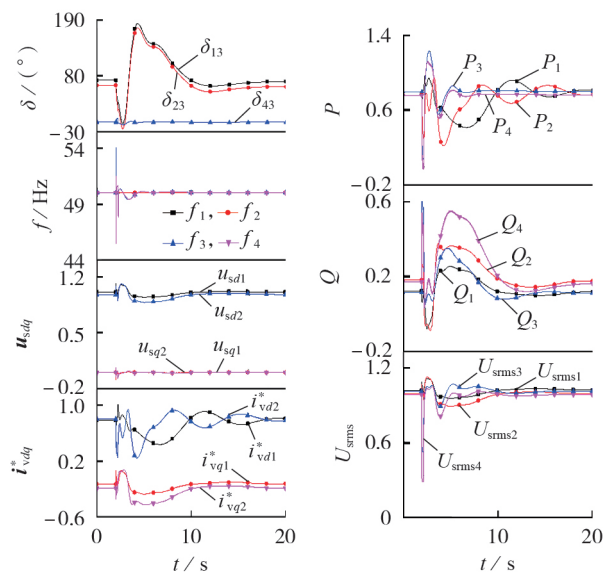
由表1中情景③和情景④、情景⑤和情景⑥、情景⑦和情景⑧可知,相比于PSC,基于DCC的VSC不能模拟同步机电源的阻尼和惯性,会减弱系统的暂态稳定性,但是减弱程度不大。

由表1中情景⑦—⑨可知,在基于PSC和DCC共存的VSC占主导的交流电网,即非同步机电源占主导的交流电网,系统的暂态稳定性非常强;且基于DCC的VSC的占比基本不影响系统的暂态稳定性。情景⑧在B₅处的三相接地故障响应特性如附录B中图B3所示,结合图B2可知,在基于PSC和DCC共存的VSC占主导的交流电网,同步机电源近端发生故障时,基于DCC的VSC可改善系统的暂态响应特性。

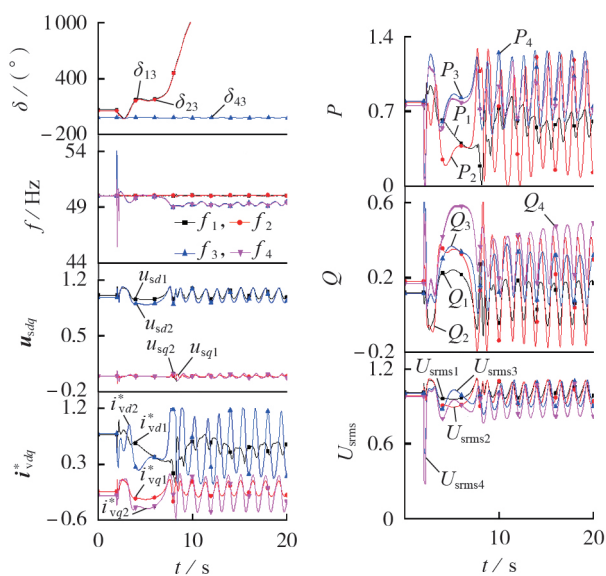
4.2.4 故障类型和故障位置

根据表1,相比于三相短路故障,系统遭受非对称故障时,由于非同步机电源可以抑制负序电流,系统的暂态稳定性显著增强。

情景③在B₅处的三相接地故障响应特性见图7。



(a) 三相接地短路,故障持续时间为0.198 s



(b) 三相接地短路,故障持续时间为0.199 s

图7 情景③在B₅处的三相接地短路故障响应特性Fig.7 Response to three-phase ground short circuit fault at B₅ of Case ③

由图B2和图7可知,在同步机电源占主导的交流电网,同步机电源近端发生故障,失稳后依然呈现出传统交流电网失稳的显著特征;在非同步机占主导的交流电网,无论哪个点发生故障,系统失稳后,都将呈现控制系统失稳的显著特征。

5 结论

针对包含非同步机电源的现代交流电网的暂态稳定性问题,本文从全局系统的角度出发,基于PSCAD/EMTDC,非同步机电源考虑基于PSC和DCC的MMC,在2区域4机系统中,通过等容量替换同步机电源,分析了CCT随非同步机电源比例、非同步机电源同步机制、非同步机电源并网位置、故障类型、故障位置5个影响因素的变化趋势。根据仿真结果,得出如下结论:

(1)随着系统中非同步机电源占比的增加,系统的暂态稳定性逐渐增强,尤其是系统遭受非对称故障时的暂态稳定性显著增强,而当系统中非同步机电源占比相同时,非同步机电源分散并网可以同时增强所在区域的暂态稳定性;

(2)当非同步机电源替代同步机电源接入系统时,非同步机电源的暂态功率响应特性会影响临近同步机电源的转子转速和转子角,进而影响各电源之间的振荡;

(3)在非同步机电源占主导的交流电网,非同步机电源近端发生故障时,暂态响应快,故障恢复时间短,不会表现出同步机电源的 $P-\delta$ 特性,系统失稳后,呈现出控制系统失稳的显著特征。

本文仅通过仿真结果分析了含非同步机电源的交流电网的暂态稳定性,未使用有效的解析方法对物理机理进行分析,笔者后续将对此进行进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家发改委能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 北京:国家发改委能源研究所,2015.
- [2] Global Wind Energy Council(GWEC). Global wind report 2019[EB/OL]. [2020-05-31]. <http://gwec.net/global-wind-report-2019>.
- [3] International Energy Agency PhotoVoltaic Power Systems(IEA-PVPS). Trends in PV applications 2019[EB/OL]. [2020-05-31]. https://iea-pvps.org/trends_reports/2019-edition.
- [4] 寇伟. 寇伟在第24届世界能源大会发言重点介绍了泛在电力物联网建设[EB/OL]. [2020-05-31]. <http://shupeidian.bjx.com.cn/html/20190912/1006711.shtml>.
- [5] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J]. 南方电网技术,2020,14(2):1-9.
XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources[J]. Southern Power System Technology,2020,14(2):1-9.
- [6] OOI B,WANG X. Voltage angle lock loop control of the Boost type PWM converter for HVDC application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1990,5(2):229-235.
- [7] 徐政,肖晃庆,张哲任,等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2016:7-9.
- [8] WU H,WANG X. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(8):6473-6482.
- [9] 马燕峰,郑力文,霍亚欣,等. 虚拟同步发电机接入电力系统的阻尼转矩分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):166-171.
MA Yanfeng,ZHENG Liwen,HUO Yaxin,et al. Damping torque analysis of virtual synchronous generator connected to power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):166-171.
- [10] 杨赞,梅飞,张宸宇,等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):125-131.
YANG Yun,MEI Fei,ZHANG Chenyu,et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(3):125-131.
- [11] 王扬,张靖,何宇,等. 虚拟同步发电机暂态稳定协同控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):181-185.
WANG Yang,ZHANG Jing,HE Yu,et al. Transient stability synergetic control of virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):181-185.
- [12] 徐政. 交直流动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:122-123.
- [13] 张保会,杨松浩,王怀远. 电力系统暂态稳定性闭环控制(一)——简单电力系统暂态不稳定判别原理[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):1-6.
ZHANG Baohui,YANG Songhao,WANG Huaiyuan. Closed-loop control of power system transient stability(1):transient instability detection principle of simple power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):1-6.
- [14] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:292-295.
- [15] 胡家兵,袁小明,程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报,2019,39(18):5457-5467.
HU Jiabing,YUAN Xiaoming,CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(18):5457-5467.
- [16] SHUAI Z,SHEN C,LIU X,et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(4):4648-4661.
- [17] HU Q,FU F,MA F,et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(4):3220-3229.
- [18] LIU Y,HUANG M,ZHA X,et al. Stability analysis of PLL influenced by control loops in grid-connected converters under fault disturbance[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2020,6(2):239-248.
- [19] 刘斯伟,李庚银,周明. 双馈风电机组接入区域系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(6):56-61.
LIU Siwei,LI Gengyin,ZHOU Ming. Impact analysis of doubly-fed induction generator on the transient angle stability of the region with wind power integrated[J]. Power System Protection and Control,2016,44(6):56-61.

- [20] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 714-715.
- [21] 李晓栋,徐政,胡四全,等. 3种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 228-235.
- LI Xiaodong, XU Zheng, HU Siquan, et al. Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 228-235.

作者简介:

李晓栋(1994—),男,河南卢氏人,博士研究生,主要研究



李晓栋

方向为直流输电与柔性交流输电(E-mail: sdu_lxd@126.com);

徐政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量等(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn);

张哲任(1988—),男,浙江杭州人,博士,主要从事柔性直流输电领域的工作和研究(E-mail: zhangzheren@zju.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Electromagnetic transient simulation study on transient stability of AC power grid with non-synchronous machine sources

LI Xiaodong, XU Zheng, ZHANG Zheren

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the increase of the proportion of both non-fossil energy in primary energy and electric energy in terminal energy, a large number of non-synchronous machine sources are connected to AC power grid through power electronic converters, which breaks the dominant position of synchronous machine sources in power grid, and makes the original complex power system stability problem more complex. In view of the transient stability problem of the AC power grid with non-synchronous machine sources, based on the electromagnetic transient simulation soft PSCAD/EMTDC, in the two-area four-machine system, by gradually replacing the synchronous machine sources with equal capacity, the trend of the critical clearing time of the AC system with five influence factors, such as the proportion of the non-synchronous machine sources, the control mode of the non-synchronous machine sources, the position of the non-synchronous machine sources connected to the power grid, the fault type and the fault position, is analyzed by simulation. The simulative results show that with the increase of the proportion of non-synchronous machine sources, the transient stability of the system is gradually enhanced. When the proportion of non-synchronous machine sources in system is same, the distributed grid connection of non-synchronous machine sources can improve the transient stability of their connected area at the same time. When the AC power grid dominated by non-synchronous machine sources suffers from faults, the transient response is quick, the fault recovery time is short, and the power-angle characteristic of synchronous machine sources is not shown.

Key words: non-synchronous machine sources; transient stability; two-area four-machine system; critical clearing time; power synchronization control

附录 A

表 A1 发电机模型参数

Table A1 Parameters of generator model			
参数	数值	参数	数值
额定容量	900 MV·A	d 轴电抗 x_d	1.8 p.u.
额定电压	20 kV	q 轴电抗 x_q	1.7 p.u.
d 轴暂态时间常数 T'_{d0}	8.0 s	d 轴暂态电抗 x'_d	0.3 p.u.
q 轴暂态时间常数 T'_{q0}	0.4 s	q 轴暂态电抗 x'_q	0.55 p.u.
d 轴次暂态时间常数 T''_{d0}	0.03 s	d 轴次暂态电抗 x''_d	0.25 p.u.
q 轴次暂态时间常数 T''_{q0}	0.05 s	q 轴次暂态电抗 x''_q	0.25 p.u.
G_1 、 G_2 惯性时间常数 H	6.5 s	G_3 、 G_4 惯性时间常数 H	6.175 s

表 A2 励磁系统模型参数

Table A2 Parameters of excitation system model			
参数	数值	参数	数值
励磁系统放大系数 K_A	200 p.u.	励磁系统时间常数 T_A	0.02 s
励磁电压上限 V_{Rmax}	6 p.u.	励磁电压下限 V_{Rmin}	-6 p.u.
励磁电流换相阻抗 K_C	0.038 p.u.	励磁输出限流器增益 K_{LR}	4.54 p.u.
励磁输出限流参考值 I_{LR}	4.4 p.u.		

表 A3 升压变压器和线路参数

Table A3 Parameters of step-up transformer and line			
参数	数值	参数	数值
线路电阻 R	0.000 1 p.u./km	变压器变比	20 kV/230 kV
线路电抗 X	0.001 p.u./km	变压器漏抗	0.15 p.u.
线路电纳 B	0.001 75 p.u./km		

表 A4 发电机出力参数

Table A4 Parameters of generator output			
发电机	有功功率/MW	无功功率/Mvar	端电压
G_1	700	185.028	1.03 p.u. $\angle 73.02^\circ$
G_2	700	234.612	1.01 p.u. $\angle 63.25^\circ$
G_3	719	189.838	1.03 p.u. $\angle 0^\circ$
G_4	700	234.132	1.01 p.u. $\angle -10.28^\circ$

表 A5 负荷和无功补偿参数

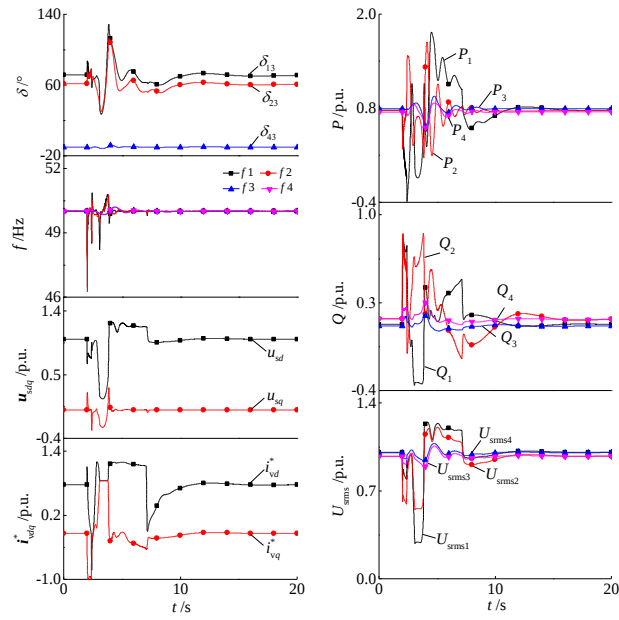
Table A5 Parameters of load and reavtive power compensation		
对象	有功功率/MW	无功功率/Mvar
L_3	967	100
C_3	0	-297.917
L_5	1 767	100
C_5	0	-350

表 A6 MMC 参数

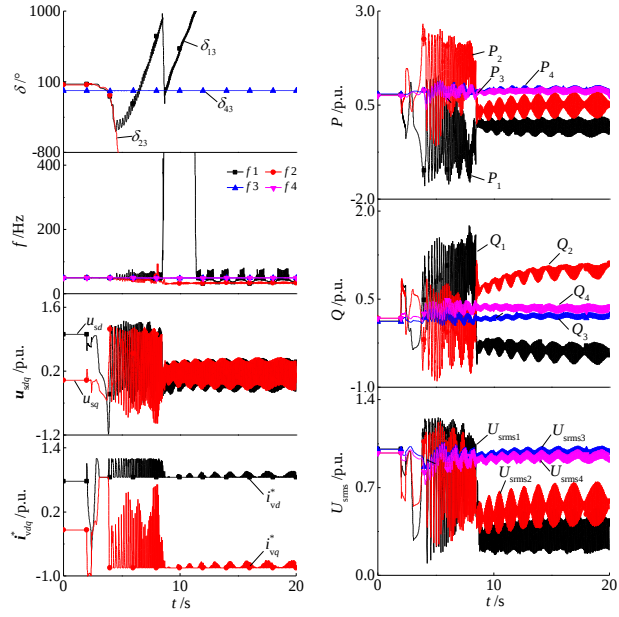
Table A6 Parameters of MMC

参数	数值	参数	数值
额定容量	900 MV·A	联结变压器额定容量	1 080 MV·A
交流母线电压	230 kV	联结变压器变比	210 kV/230 kV
额定直流电压	400 kV	联结变压器漏抗	0.15 p.u.
子模块电容电压	2 kV	桥臂子模块个数	200
子模块电容值	15 mF	桥臂电抗	33.77 mH

附录 B



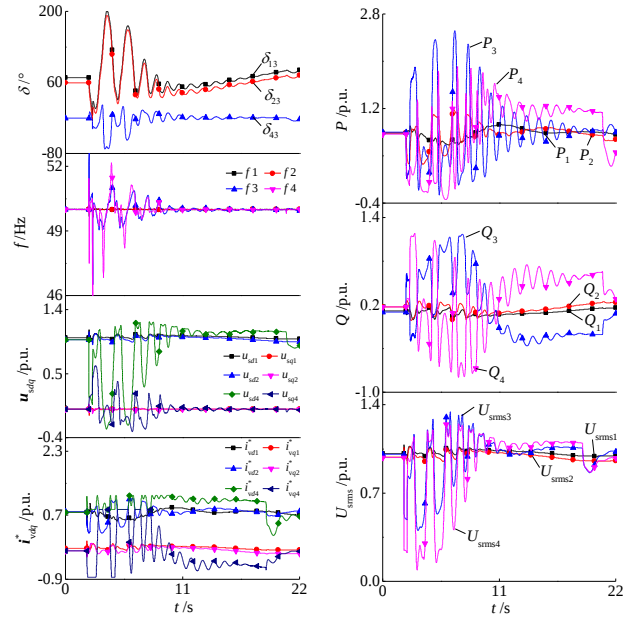
(a) 两相接地短路，故障持续时间为 0.377 s



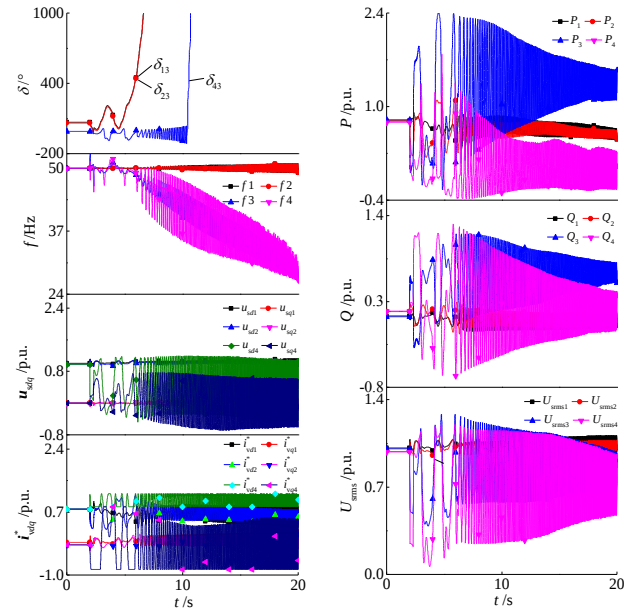
(b) 两相接地短路，故障持续时间为 0.378 s

图 B1 情景②在 B₃ 处两相接地短路故障响应特性

Fig.B1 Response to two-phase ground short circuit fault at B₃ of Case ②



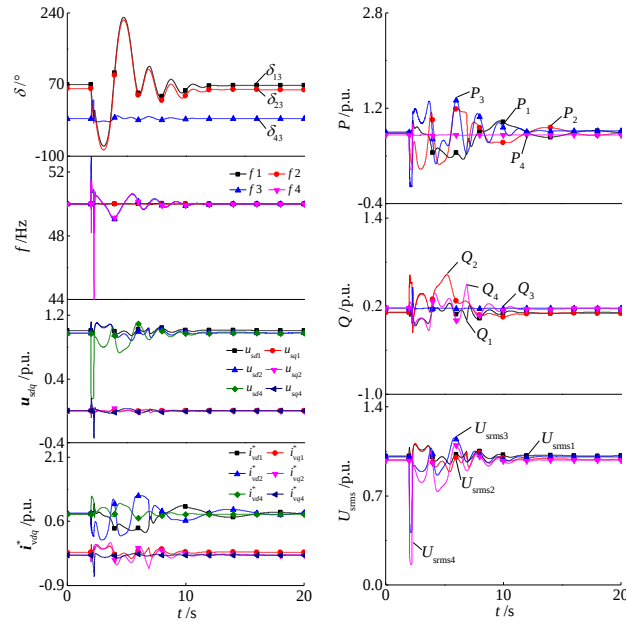
(a) 三相接地短路，故障持续时间为 0.301 s



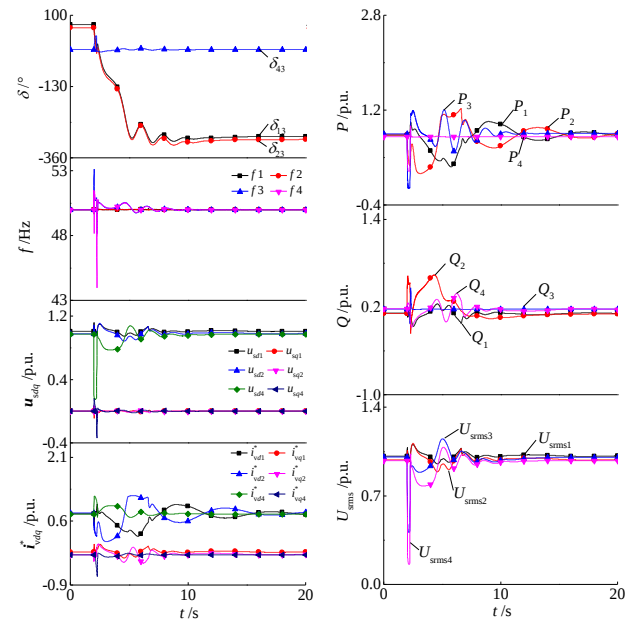
(b) 三相接地短路，故障持续时间为 0.302 s

图 B2 情景⑦在 B₅ 处三相接地短路故障响应特性

Fig.B2 Response to three-phase ground short circuit fault at B₅ of Case ⑦



(a) 三相接地短路，故障持续时间为 0.232 s



(b) 三相接地短路，故障持续时间为 0.233 s

图 B3 情景⑧在 B₅ 处的三相接地短路故障响应特性

Fig.B3 Response to three-phase ground short circuit fault at B₅ of Case ⑧