

关于多特征自变量调节的含UPFC电力系统的潮流变化率特性

刘津濂¹,徐政¹,杨健¹,张哲任¹,宋鹏程²

(1. 浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027;2. 国家电网有限公司 国家电力调度控制中心,北京 100032)

摘要:含统一潮流控制器(UPFC)的电力系统潮流变化率或调节效率主要由UPFC输出的串联侧嵌入电压(OSIV)的幅值和相角以及系统相角差所决定。选择这3个变量作为系统潮流调节的特征自变量(CIV),以含UPFC双端电力系统的实际电路为背景,推导了系统不同关键节点处关于每个CIV的有功与无功潮流变化率数学模型。以系统潮流调节自由度和调节效率为依据,对系统潮流变化率的调节特性进行了理论分析。设置了多种典型系统运行工况,基于OSIV幅值和相角的2种递增变化组合方式设计了2种潮流变化率调节模式,并设计了关于系统相角差的多种典型调节场景。最后,对系统每个关键节点处的关于每个CIV的潮流变化率特性进行了案例测试与分析,所得结论有利于综合协调潮流调节效率与系统保护及稳定性的要求,使电网既高效又稳定地运行。

关键词:统一潮流控制器;串联侧嵌入电压;潮流变化率;特征自变量;关键节点;系统运行工况

中图分类号:TM 744

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012019

0 引言

统一潮流控制器UPFC(Unified Power Flow Controller)拥有进行电力系统的电压调节、阻抗补偿、相角补偿以及潮流综合调节等多种功能,并已发展成为当今最先进的柔性交流输电装置之一^[1]。近几年,在我国多个地区不同电压等级的电网中相继开展了多个UPFC试验示范工程,有效缓解了当地电网潮流分布不均、断面容量受限、输电能力较弱、无功支撑不足等问题^[2-4]。其中,调节电网潮流是UPFC在工程中最基本和最主要的功能之一。因此,关于UPFC的潮流建模、潮流调节特性及控制策略等方面的理论得到了广泛研究和发展^[5]。

常见的UPFC稳态潮流模型包括了功率注入模型^[6]、节点注入模型^[7]以及 π 型负载注入模型^[8]等。另外,文献[9]提出了一种以UPFC串联侧电流为变量并考虑电流受限情况的UPFC潮流模型。文献[10]建立了一种考虑最小化系统功率损耗的UPFC最优潮流模型。上述现有的UPFC潮流建模策略往往对系统的电路参数或拓扑结构进行了等效变换或简化,以实现系统潮流计算性能或收敛特性等方面的提升。然而,采用这些等效建模方法却改变了系统的原始实际电路,使得理论计算结果往往与实际电路中的真实结果有着一定程度的差别。

以现有潮流建模研究为基础,UPFC在电网中的潮流调节特性也得到了深入研究与发展。文献[11]

针对UPFC在本地和远方的静态潮流调节能力以及影响因素进行了研究,指出UPFC需要采用不同的调节幅度来适应不同的潮流变化方向。文献[12]在3个IEEE标准测试系统中对多个UPFC潮流模型的潮流计算时间、电压调节能力和潮流调节范围等进行了分析比较。文献[13]对电网正常运行和发生N-1故障情况下的南京西环网UPFC对线路的实际潮流控制范围和调节能力进行了计算分析。文献[14]对UPFC潮流控制目标的可调范围进行了研究。文献[15]研究了UPFC有功调节对电压控制器的影响。以上研究所采用的稳态潮流模型都将UPFC输出的串联侧嵌入电压OSIV(Output Series Inserted Voltage)等效为具有特定幅值和相角的电压源,却并未对OSIV幅值和相角实时变化情况下的潮流变化规律进行研究。另外,以上研究往往侧重于对系统潮流调节范围和控制效果的分析,而缺乏对于潮流变化率PFG(Power Flow Gradient)及多样性的建模分析,因而无法掌握系统潮流调节的变化率特性及其可能造成的影响。

为了优化UPFC的潮流控制效果,很多专家学者也开展了大量关于UPFC控制策略的研究,主要包括常用的交叉耦合与交叉解耦控制策略^[16]、反馈线性化控制方法^[17]、多目标协调控制策略^[18]以及系统级控制策略^[19]等。然而,以上研究都主要致力于通过改进或优化UPFC的控制能力以优化系统潮流调节的精确性、平滑性或均衡分布特性,对于系统潮流在UPFC输出的关键变量的控制下而发生变化的效率和具体过程却并未涉及。

实际上,当UPFC嵌入电力系统后,系统从送端

收稿日期:2020-04-03;修回日期:2020-10-29

基金项目:国家电网公司总部科技项目(SGTYHT/15-JS-191)
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGTYHT/15-JS-191)

到受端的多个不同被选关键节点 SCP(Selected Critical Point)处的有功和无功潮流都已经发生了明显改变。系统潮流主要受 UPFC 输出的 OSIV 幅值和相角的支配,同时也随着系统运行工况的改变而变化。当以上变量以不同的调节方式而变化时,系统中不同 SCP 处的 PFG 特性也各有不同,因而在不同 SCP 处所产生的浪涌电流、不平衡电压、功角振荡以及暂态热能剧增等效果对系统造成的影响也是不确定的。因此,有必要研究和掌握关于多个关键变量调节的系统 PFG 特性,这既有利于高效地完成潮流调节过程,又能够避免对系统造成过大的浪涌电流、功角摇摆等冲击效应。这对于进一步完善改进现有 UPFC 工程在未来的研究、提高控制线路潮流的效率以及改善系统功角和电压稳定性等方面均具有实际的意义。

本文将含 UPFC 的双端输电系统的实际电路为基础,对系统多个 SCP 处的关于系统多个特征变量的 PFG 特性进行理论建模、分析和测试,并对多种类型的测试结果进行分析与总结归纳,以期 UPFC 的工程运行和调节提供实用的参考。

1 含 UPFC 系统 PFG 建模与理论分析

1.1 UPFC 的潮流调节原理及特征自变量的选取

通常情况下,含 UPFC 的典型双端电力系统的实际电路结构如图 1 所示。图中, I_1 为通过 UPFC 串联变压器的线路电流相量的幅值; Z_r 为系统母线 Bus2 后的受端线路阻抗。该系统的输电线路送端与受端均为交流电网。整个 UPFC 的结构如点划线框部分所示,主要包括 2 个背靠背的换流器以及公共直流母线。其中并联侧换流器主要用于维持送端母线 Bus1 和背靠背直流电压的稳定性,而串联侧换流器主要通过向系统线路输出 1 个幅值及相角均可调节的电压来调节系统有功和无功功率。

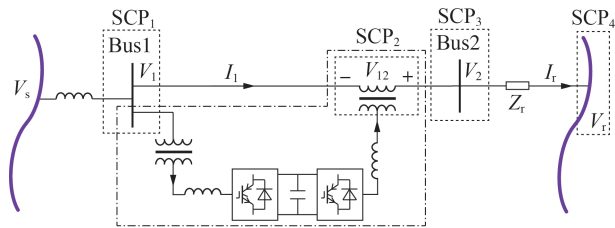


图 1 含 UPFC 双端电力系统的结构示意图

Fig.1 Structural schematic diagram of UPFC embedded double-end power system

为了详细研究系统沿送端到受端不同典型位置处的 PFG 特性,本文选取了 4 个关键节点(如图 1 中虚线框部分所示)。其中,SCP₁ 表示 UPFC 并联侧换流器所连接的母线 Bus1,其电压幅值为 V_1 ;SCP₂ 表示 UPFC 输出的 OSIV,其幅值为 V_{12} ,相角为 θ ;SCP₃ 表

示系统母线 Bus2,其电压幅值为 V_2 ;SCP₄ 表示系统受端母线,其电压幅值为 V_r ,相角为 δ 。为了便于建模和分析,本文以系统受端与送端母线 Bus1 之间的相角差表示系统的相角差,此时系统的相角差等效于受端母线的电压相角 δ 。

根据现有研究,含 UPFC 系统中的潮流调节主要受 UPFC 输出的 OSIV 幅值和相角的支配。这 2 个变量既可以单独调节,又可以组合起来同步调节。为了形象地描绘 OSIV 的幅值和相角的各种变化形式,附录 A 中图 A1 分别采用不同颜色(红色、蓝色和黄色)的实线展示了相量 V_{12} 的 3 种典型变化情况,同时 V_{12} 的旋转变化的轨迹也采用了相应颜色的虚线表示。可见随着 V_{12} 的变化,系统母线 Bus2 的电压 V_2 、系统受端线路阻抗的电压 V_{Z_r} 以及通过 UPFC 串联变压器的线路电流 I_1 这 3 个相量也将随之发生变化,其对应的变化情况在图 A1 中用相应颜色的实线进行了展示。由此使得系统不同 SCP 处的有功与无功功率发生改变。

另一方面,系统送端母线 Bus1 的电压幅值 V_1 通常可以在 UPFC 并联侧换流器的强无功支撑下保持恒定,因此其相量始终保持在图 A1 中的初始水平位置。当系统运行工况(包括系统相角差 δ 和受端母线电压幅值 V_r)变化,即相量 V_r 的幅值和相角发生变化时,即使 V_{12} 的幅值和相角保持不变,相量 V_2 、 V_{Z_r} 及 I_1 也将发生变化,因而系统不同 SCP 处的有功与无功潮流也发生了变化。图 A1 也采用了不同颜色的虚线展示了当系统运行工况变化时相关相量的变化情况。

综上所述,含 UPFC 电力系统中的潮流既可能因 OSIV 的幅值和相角调节而变化,同时也可能随系统运行工况的改变而变化。考虑到交流输电系统在通常情况下都具有足够的无功补偿容量,以维持母线电压的稳定,因而系统受端母线电压的幅值 V_r 通常只在很小范围内波动。因此,含 UPFC 系统的潮流调节通常主要受 OSIV 的幅值 V_{12} 、OSIV 的相角 θ 以及系统相角差 δ 的支配或影响,将这 3 个变量设定为系统潮流调节的特征自变量 CIV (Characteristic Independent Variable),分别记为 CIV₁—CIV₃。

1.2 含 UPFC 系统的 PFG 数学模型

系统的 PFG 包括了有功变化率 APFG (Active Power Flow Gradient) 和无功变化率 RPF (Reactive Power Flow Gradient)。本小节将分别推导系统每个 SCP 处关于每个 CIV 的 APFG 与 RPF 数学模型。

设 j 为 SCP 的序号,且 $j=1,2,3,4$; P_j, Q_j 分别为在 SCP _{j} 处的有功、无功容量; dP_j/dV_{12} 、 dQ_j/dV_{12} 分别为在系统 SCP _{j} 处关于 CIV₁ 的 APFG 和关于 CIV₁ 的

RPF G ; $dP_j/d\theta$ 、 $dQ_j/d\theta$ 分别为在系统 SCP_j 处关于 CIV_2 的 APFG 和关于 CIV_2 的 RPF G ; $dP_j/d\delta$ 、 $dQ_j/d\delta$ 分别为在系统 SCP_j 处关于 CIV_3 的 APFG 和关于 CIV_3 的 RPF G 。基于以上定义及文献[20]中推导的含 UPFC 双端系统不同 SCP 处的原始潮流数学模型,可进一步推导出系统每个 SCP 处关于每个 CIV 的 APFG 与 RPF G 数学模型,如附录 A 中式(A1)~(A12)所示。

1.3 含 UPFC 系统的 PFG 调节特性理论分析

根据 UPFC 的潮流调节原理及 PFG 数学模型,可以对含 UPFC 系统中关于 CIV 的 PFG 调节含义或目标进行进一步的理论分析。简言之,当特定的 CIV 在不同区域中调节时,系统不同 SCP 处关于 CIV 的 APFG 和 RPF G 将变化到更高或更低的水平或级别。此时,系统潮流可以更高或更低的效率过渡到新的目标值。

具体而言,如果系统中 PFG 被调节到更高的水平,系统潮流的调节效率就变得更高,从而更快速地过渡到所需目标值。但与此同时,系统潮流在调节过渡中的变化将更加剧烈,由此对系统造成的浪涌电流或不平衡电压等暂态冲击效果会更加严重,并对系统的运行稳定性造成较大的影响。反之,如果系统中 PFG 被调节到更低的水平,系统中的潮流调节效率就变得更低,系统潮流将更缓慢地过渡到所需目标值。此时,系统中出现的浪涌电流或不平衡电压等暂态冲击效果会更加微弱,系统的运行稳定性不会受到明显的影响。

然后,根据 PFG 数学模型对系统不同 SCP 处关于每个 CIV 的 APFG 与 RPF G 调节特性从调节自由度及调节效率方面进行理论分析。

在系统 SCP_1 处,根据式(A1)~(A3), dP_1/dV_{12} 、 dQ_1/dV_{12} 只与 CIV_2 相关,因此只有 1 个潮流调节自由度; $dP_1/d\theta$ 、 $dQ_1/d\theta$ 同时与 CIV_1 和 CIV_2 相关,因此拥有 2 个调节自由度; $dP_1/d\delta$ 与 $dQ_1/d\delta$ 只受 CIV_3 支配,因而只拥有 1 个调节自由度。因此,在系统 SCP_1 处, $dP_1/d\theta$ 、 $dQ_1/d\theta$ 拥有最复杂多样的调节规律。同理,根据式(A4)~(A6)可知,在系统 SCP_2 处, dP_2/dV_{12} 、 dQ_2/dV_{12} 也只拥有 1 个调节自由度,而 $dP_2/d\theta$ 、 $dQ_2/d\theta$ 和 $dP_2/d\delta$ 、 $dQ_2/d\delta$ 都同时拥有 3 个调节自由度,因此在 SCP_2 处,关于 CIV_2 与 CIV_3 的 PFG 拥有更加复杂多样的调节规律。类似地,根据式(A7)~(A9),在系统 SCP_3 处, dP_3/dV_{12} 、 dQ_3/dV_{12} 、 $dP_3/d\theta$ 、 $dQ_3/d\theta$ 和 $dP_3/d\delta$ 、 $dQ_3/d\delta$ 均同时拥有 3 个调节自由度,表明系统 SCP_3 处关于每个 CIV 的 PFG 都有最复杂多样的调节规律。在系统 SCP_4 处,根据式(A10)~(A12), dP_4/dV_{12} 、 dQ_4/dV_{12} 都只有 2 个调节自由度,而 $dP_4/d\theta$ 、 $dQ_4/d\theta$ 和 $dP_4/d\delta$ 、 $dQ_4/d\delta$ 均拥有 3 个调节自由度,因此 SCP_4 处的 PFG 调节规律与 SCP_2 处比较相似。

综上所述,系统 SCP_3 处关于每个 CIV 的 PFG 都

拥有最多的 3 个潮流调节自由度,因此 SCP_3 处的潮流调节规律是最多样或最复杂的。系统 SCP_2 处和 SCP_4 处关于 CIV_2 和 CIV_3 的 PFG 均拥有 3 个调节自由度,且这 2 个 SCP 处的潮流调节规律是相似的,其复杂度略低于 SCP_3 处。而在系统 SCP_1 处,其调节规律是最简单的且潮流变化是相对最稳定的。因此,在 SCP_2 处 UPFC 输出功率的调节作用下,系统受端 SCP_3 处与 SCP_4 处的潮流都得到了丰富和高效的调节效果,同时系统送端 SCP_1 处的潮流能够维持相对稳定的运行状态。

2 案例测试与分析

2.1 PFG 调节模式和调节情景的设定

根据 PFG 数学模型与理论分析,本节将对系统的 PFG 调节规律进行案例测试与分析。首先设定系统的几种典型运行工况。由于系统母线 Bus1 的电压 V_1 能够维持在初始水平位置而保持不变,因此系统运行工况的变化主要包括系统受端电压 V_r 和系统相角差 δ 的改变。设置 4 种系统典型运行工况(简称 Cond.1~Cond.4)如表 1 所示,前 3 种属于正常运行工况,最后 1 种属于恶劣运行工况。表中 V_r 为标么值。

表 1 不同系统典型运行工况的设置
Table 1 Settings of different typical system operation conditions

系统工况	V_r	δ / rad
1	1.00	$-\pi/8$
2	1.00	$-\pi/24$
3	0.90	$-\pi/8$
4	0.82	$-\pi/2$

一方面,需要对多 CIV 的调节模式进行设定。由于 UPFC 输出的 OSIV 具有 CIV_1 与 CIV_2 这 2 个 CIV 需进行调节。因此,先设定 CIV_1 的调节范围为 $0 \sim 4 \text{ p.u.}$,而 CIV_2 的调节范围为 $-\pi \sim \pi$ 。当设定 CIV_1 由 0 按照一定步长逐渐递增至 4 p.u. 时, CIV_2 可以按照 2 种步长递增调节方式与 CIV_1 进行配合,一种是 CIV_2 从 $-\pi$ 按照一定步长逐步递增至 π ,称之为调节模式 1(简称 Reg.1),而另一种是 CIV_2 从 π 按照一定步长逐步递减至 $-\pi$,称之为调节模式 2(简称 Reg.2)。这 2 种调节模式可以代表关于 CIV_1 和 CIV_2 基本的且通用的组合调节方式,而其他更复杂或更特殊的调节模式往往只适用于特定的场合而不具有代表性,因此本文不再赘述。

另一方面,还需要将关于系统运行工况的系统相角差 δ (CIV_3) 设定为在 $-\pi \sim \pi$ 范围内的连续变量,以计算分析关于 CIV_3 的 PFG。在这种情况下,若设定 UPFC 的 OSIV 幅值 V_{12} (CIV_1) 继续保持原来的调节变化范围及调节模式,则可以通过调节 OSIV 的相

角 θ (CIV_2) 至不同的特定数值来改变系统的 PFG, 以适应系统相角差 δ 的变化。在本文的案例测试中, 设置了关于 CIV_2 的 4 个不同典型调节数值, 如表 2 所示, 由此对应于 4 种典型的关于 CIV_3 的 PFG 调节场景 1—4 (简称 Scen.1—Scen.4)。

表 2 关于 CIV_3 的典型调节场景设计

Table 2 Design of typical regulation scenarios regarding CIV_3

调节场景	θ / rad	δ / rad
1	$-\pi/8$	
2	$-\pi/24$	
3	$-\pi/24$	$-\pi \sim \pi$
4	$-\pi/2$	

最后, 设在调节过程中 CIV_1 的变化步长为 0.008 p.u., CIV_2 与 CIV_3 的变化步长均为 $\pi/50$ 。至此, 基于系统 PFG 数学模型和关于 CIV_1 、 CIV_2 的 2 种调节模式以及关于 CIV_3 的调节场景, 可以对关于每个 CIV 的 PFG 调节规律进行数值求解计算。

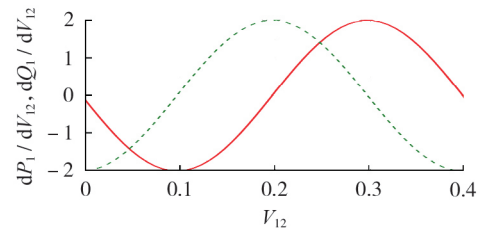
2.2 系统 SCP_1 处的 PFG 测试结果与分析

本节通过数值计算得到含 UPFC 系统在不同 SCP 处的 PFG 测试结果, 图 2 展示了 SCP_1 处关于各 CIV 的 PFG 测试结果。图中, dP_1/dV_{12} 、 dQ_1/dV_{12} 、 V_{12} 、 $dP_1/d\theta$ 、 $dQ_1/d\theta$ 、 $dP_1/d\delta$ 、 $dQ_1/d\delta$ 均为标么值, 后同。

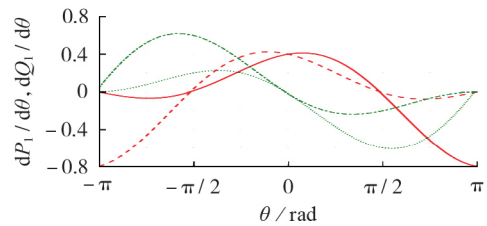
由图 2 可以看出, dP_1/dV_{12} 和 dQ_1/dV_{12} 呈现出幅值相似的正弦型曲线, 只是各自的峰值分布位置有所不同; $dP_1/d\theta$ 与 $dQ_1/d\theta$ 呈现出不同幅值和变化规律的波动曲线, 其中 $dP_1/d\theta$ 采用 2 种调节模式的变化曲线关于穿过原点的 y 轴近似对称, 而 $dQ_1/d\theta$ 在 2 种调节模式下的变化曲线关于原点近似旋转对称, 并且 $dP_1/d\theta$ 与 $dQ_1/d\theta$ 在 2 种调节模式下的曲线都在正负半轴区域有着不同水平的峰值。另一方面, 2 种调节模式下的 $dP_1/d\theta$ 相对 $dQ_1/d\theta$ 曲线形成了特殊的闭合形状区域使得系统潮流在 CIV_1 和 CIV_2 的 2 种调节模式下都能获得更广泛的调节范围, 有利于适应在不同系统运行工况下的调节需求, 明显增强了 UPFC 在潮流调节中的调节效率和适应性。

另外, 在不同系统运行工况下的所有 $dP_1/d\delta$ 与 $dQ_1/d\delta$ 都呈现出正弦型曲线, 并且在图中的位置或相位也几乎一致。其主要不同之处在于, 这些曲线在不同系统运行工况下都具有不同的峰值, 表明 UPFC 能够实时地调节 PFG 的幅值以适应不同运行工况的需求。根据式 (A3) 和测试结果, 在不同运行工况下的 $dP_1/d\delta$ 相对 $dQ_1/d\delta$ 关系曲线均呈现为不同幅值的同心圆形曲线。

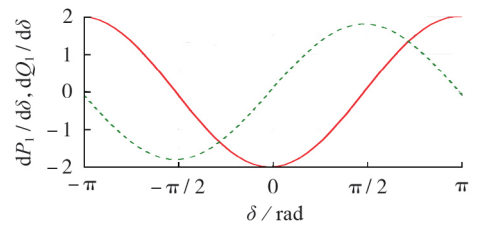
需要指出的是, 当 PFG 调节到更高的水平时, UPFC 的潮流调节效率越高, 由此对系统所造成的暂态冲击或振荡会更加剧烈, 此时对抑制系统后续冲



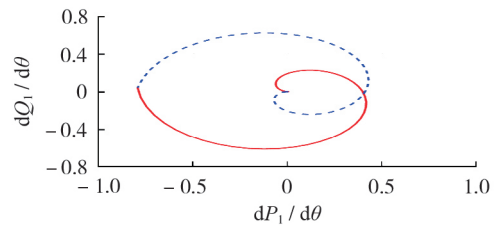
(a) 关于 CIV_1 的 APFG 与 RPF



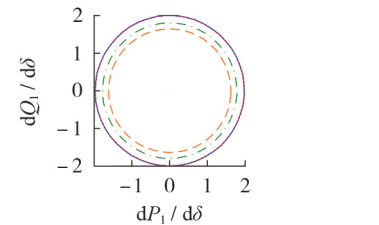
(b) 关于 CIV_2 的 APFG 与 RPF



(c) 关于 CIV_3 的 APFG 与 RPF



(d) 关于 CIV_2 的 APFG 相对 RPF



(e) 关于 CIV_3 的 APFG 相对 RPF

图 2 SCP_1 处的关于每个 CIV 的 PFG 测试结果

Fig.2 Test results of PFG to each CIV at SCP_1

击或振荡的保护要求以及维护系统稳定性的要求也越高。

2.3 系统 SCP_2 处的 PFG 测试结果与分析

与上文分析方式相似, SCP_2 处关于所有 CIV 的 PFG 测试结果如附录 B 中图 B1 所示。由图 B1 可知,

dP_2/dV_{12} 与 dQ_2/dV_{12} 呈现出的调节规律与在SCP₁处的基本类似,而对于不同运行工况,在不同调节模式下的 $dP_2/d\theta$ 与 $dQ_2/d\theta$ 变化规律则各不相同。首先,不同正常运行工况下用不同调节模式的 $dP_2/d\theta$ 基本都集中在-0.2~0.2 p.u.的变化范围内,且都呈现出相似的正弦型曲线。而在恶劣运行工况下用调节模式2的 $dP_2/d\theta$ 曲线幅值则明显增大了2~4倍,表明调节模式2下的关于CIV₂的潮流调节效率会得到明显提高以满足系统恶劣工况下的要求。 $dQ_2/d\theta$ 的测试结果也基本呈现出与 $dP_2/d\theta$ 相类似的调节变化规律,不同之处在于,各 $dQ_2/d\theta$ 曲线的峰值位置与 $dP_2/d\theta$ 有所不同。进一步根据 $dP_2/d\theta$ 相对 $dQ_2/d\theta$ 曲线可以看出,不同系统运行工况下用不同调节模式的测试结果仍然呈现出特殊形状的闭合曲线,并且在恶劣运行工况下用调节模式2的PFG曲线所占范围明显大于其他工况及调节模式的曲线。

另外,对于所有 $dP_2/d\delta$ 与 $dQ_2/d\delta$,由于其具有3个调节自由度,因此测试中得到了分别针对3种关于CIV₃调节场景的不同结果。可以看出,所有曲线仍然都呈现出正弦变化规律,但在不同调节场景下的PFG曲线都具有对应不同CIV₃区域的不同PFG幅值及峰值,表明关于CIV₃的调节的PFG能够在设定的不同调节场景中获得丰富多样的调节效率或规律。

2.4 系统SCP₃处的PFG测试结果与分析

SCP₃处关于所有CIV的PFG测试结果如附录B中图B2所示。根据式(A7)~(A9)及理论分析,关于所有CIV的PFG都拥有3个调节自由度,因此SCP₃处的PFG具有最丰富的调节变化规律。由图B2可知,在正常运行工况下的 dP_3/dV_{12} 与 dQ_3/dV_{12} 大多集中在-2~3 p.u.的范围内,但在恶劣运行工况下的相应PFG曲线幅值均会增加,从而得到更高的潮流调节效率。在不同系统工况下用不同调节模式的 $dP_3/d\theta$ 与 $dQ_3/d\theta$ 都与SCP₂处的相应规律十分近似。同时,在不同调节场景下的 $dP_3/d\delta$ 与 $dQ_3/d\delta$ 曲线均集中于各自的特定区域内,所有曲线的幅值及对应坐标位置差别很小且变化规律基本一致。

另外,SCP₃处的 dP_3/dV_{12} 相对 dQ_3/dV_{12} 曲线呈现近似闭合的环形,且都拥有较大的调节范围及区域,并且在系统恶劣工况下的调节范围仍然大于正常工况。同时,SCP₃处的 $dP_3/d\theta$ 与 $dQ_3/d\theta$ 的测试结果仍然形成了特殊的闭合曲线形状,并且在系统恶劣工况下用调节模式2的PFG测试曲线依然具有更大范围的调节范围及空间。

2.5 系统SCP₄处的PFG测试结果与分析

与上文分析类似,附录B中图B3给出了SCP₄处关于所有CIV的PFG测试结果。根据式(A10)~

(A12)及其理论分析, dP_4/dV_{12} 与 dQ_4/dV_{12} 均拥有2个调节自由度,不同运行工况下的测试曲线都分别集中在各自的特定区域,且都有相似的调节幅值及区域; $dP_4/d\theta$ 与 $dQ_4/d\theta$ 具有3个调节自由度,其在不同运行工况下用不同调节模式的测试结果也与SCP₂和SCP₃处的测试结果基本相似。同样地,在不同调节场景下的 $dP_4/d\delta$ 与 $dQ_4/d\delta$ 的测试结果也与SCP₃处类似,并且分别集中于各自不同的特定区域,同时也具有非常近似的调节幅值及对应坐标位置。

另外,在不同系统运行工况下的 dP_4/dV_{12} 相对 dQ_4/dV_{12} 曲线呈现为不同直径的闭合圆形。同时,在不同运行工况下用不同调节模式的 $dP_4/d\theta$ 与 $dQ_4/d\theta$ 曲线呈现为特殊的闭环曲线形状,并且用调节模式1的PFG调节范围略大于调节模式2的范围,表明在系统受端处用调节模式1的关于CIV₂的PFG具有更大范围的调节区域。

3 结论

本文以含UPFC的双端输电系统的实际电路为基础,选取了PFG调节的3个CIV,设定了不同潮流调节模式和调节场景,针对系统多个SCP处的关于每个CIV的PFG调节特性进行理论建模、分析和测试,得出的主要结论可归纳总结如下。

(1)系统SCP₃处关于每个CIV的PFG都拥有最多的3个潮流调节自由度,其潮流调节规律是最多样或最复杂的;系统SCP₂处和SCP₄处关于CIV₂和CIV₃的PFG是相似的且均拥有3个调节自由度,其复杂度略低于SCP₃处;系统SCP₁处的PFG调节特性是最简单的,并且潮流变化是相对最稳定的。因此,在SCP₂处UPFC输出功率的调节作用下,系统受端的SCP₃处与SCP₄处的潮流均获得了丰富高效的调节效果,而系统SCP₁处的潮流能够维持相对稳定的运行状态。

(2)在设定的2种调节模式下,较高的PFG水平对应了较高的潮流调节效率。在不同正常运行工况下用不同调节模式的关于不同CIV的PFG的变化往往集中于特定范围内,并且都呈现相似的正弦型曲线;在恶劣运行工况下用调节模式2的PFG曲线范围明显扩大,有利于适应不同系统运行工况的调节需求。

(3)在系统不同运行工况下,不同SCP处用2种调节模式的关于CIV₂的APFG相对RPFG曲线形成了特殊的闭合形状。同时,在SCP₂和SCP₃处用调节模式2的PFG有着更大的调节范围,而在SCP₄处用调节模式1的PFG则拥有更大的调节范围。关于CIV₃的APFG相对RPFG曲线在不同调节场景下均呈现出不同直径的同心圆形曲线。

(4)当关于 CIV 的 PFG 处于更高的调节水平时,系统潮流的调节效率更高,但由此对系统所造成的暂态冲击或振荡会更加剧烈,并对系统稳定性的不利影响也更加严重,从而对抑制系统冲击或振荡的保护要求以及系统稳定性的维护要求也就更高。因此在系统潮流调节过程中需要综合协调潮流调节效率与系统保护和稳定性要求,做出有利于电网经济稳定运行的选择。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] SCHAUDER C D, GYUGYI L, LUND M R, et al. Operation of the Unified Power Flow Controller (UPFC) under practical constraints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2): 630-639.
- [2] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127. CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing Western Grid and its harmonic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [3] 杨林, 蔡晖, 汪惟源, 等. 500 kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 47-53. YANG Lin, CAI Hui, WANG Weiyuan, et al. Application of 500 kV UPFC in Suzhou Southern Power Grid[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 47-53.
- [4] CUI Yong, YU Yinghui, BAO Wei, et al. Analysis of application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai Grid[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 758-762.
- [5] GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. Unified power flow controllers in smart power systems: models, methods, and future research[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(1): 2-10.
- [6] ZARGHAMI M, CROW M L. The existence of multiple equilibria in the UPFC power injection model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2280-2282.
- [7] 陈业飞, 李林川, 张芳, 等. 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 69-74. CHEN Yefei, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 69-74.
- [8] ALOMOUSH M. Exact pi-model of UPFC-inserted transmission lines in power flow studies[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(10): 54-56.
- [9] MARCOS P, LUIZ C. A current based model for load flow studies with UPFC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 677-682.
- [10] ABBAS R, MAHMUD F, MUHAMMAD O. Optimal unified power flow controller application to enhance total transfer capability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(4): 358-368.
- [11] 陈金富, 段献忠, 何仰赞. 统一潮流控制器的静态潮流调节能力分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(3): 92-95. CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, HE Yangzan. Load flow control capability analysis of UPFC[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 1999, 39(3): 92-95.
- [12] 郑华, 高芬. 统一潮流控制器潮流模型及功率调节能力分析

[J]. 现代电力, 2015, 32(2): 43-49.

ZHENG Hua, GAO Fen. Analysis of unified power flow controller model and its control capability of power flow[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 43-49.

- [13] 韩冰, 张宇宇, 胡昊明, 等. 考虑 UPFC 实时控制策略的电网功率调节能力研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 1-7. HAN Bing, ZHANG Ningyu, HU Haoming, et al. Control capability analysis of unified power flow controller considering real-time control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 1-7.
- [14] 李生虎, 汪婷, 吴东, 等. 基于初值估算和潮流可控范围的 UPFC 潮流收敛特性研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 67-72. LI Shenghu, WANG Ting, WU Dong, et al. Power flow convergence characteristic of UPFC based on initial value evaluation and controllable range of power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 67-72.
- [15] 马朋, 刘青, 邹家平, 等. UPFC 有功控制引起的交互影响研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 176-181. MA Peng, LIU Qing, ZOU Jiaping, et al. Research on interaction during active power-flow control of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 176-181.
- [16] 蔡松, 段善旭, 蔡礼. 基于交叉耦合与交叉解耦的 UPFC 控制性能对比[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 45-48. CAI Song, DUAN Shanxu, CAI Li. Comparison of UPFC performance between cross coupling and decoupling controls[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 45-48.
- [17] ILANGO G S, NAGAMANI C, SAI A V S S R, et al. Control algorithms for control of real and reactive power flows and power oscillation damping using UPFC[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 595-605.
- [18] 张曼, 张春朋, 姜齐荣, 等. 统一潮流控制器多目标协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1008-1013. ZHANG Man, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, et al. Study on multi-objective coordinated control strategy of unified power flow controller[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1008-1013.
- [19] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96. QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [20] LIU J, XU Z, XIAO L. Comprehensive power flow analyses and novel feedforward coordination control strategy for MMC-based UPFC[J]. Energies, 2019, 12(5): 824.

作者简介:



刘津濂

刘津濂(1988—),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为柔性交直流输电建模及应用(E-mail: ljl0323@zju.edu.cn);

徐政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为 HVDC、FACTS 及新能源并网理论等(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn);

杨健(1992—),男,辽宁锦州人,博士研究生,主要研究方向为柔性交直流输电建模及应用(E-mail: yangjian_zju@zju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第 210 页 continued on page 210)

Power supply scheme of traction cable co-phase connected power supply system for heavy-haul railway powered by AT

ZHANG Heng¹, WANG Hui¹, LI Qunzhan¹, XIA Mengyi², ZHANG Yu¹, SU Peng¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Electrification Department, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Aiming at heavy-haul railways powered by AT (AutoTransformer), in order to further improve its capacity and the utilization rate of regenerative braking energy, a power supply scheme of heavy-haul railway traction cable co-phase connected power supply system powered by AT is proposed. Firstly, the proposed power supply scheme is introduced. Secondly, the power supply ability of the power supply system is studied, the equivalent model of the power supply system is established, the current distribution of the power supply system is analyzed, the equivalent impedance of traction network is calculated, and the mathematical model of power supply ability is deduced according to its voltage distribution relationship, which provides basis for the preliminary design of the scheme. Then, taking the transformation design of an actual heavy-haul line as a case, the power supply ability and energy consumption of the existing scheme and the proposed scheme are simulated and verified. Finally, the transformation cost and operation economy are analyzed. The analysis results show that the proposed scheme can extend the power supply distance, reduce the energy consumption of traction power supply system, improve the utilization rate of regenerative braking energy, and save external power resources, having good economic benefit.

Key words: heavy-haul railway; AT power supply; traction cable co-phase connected power supply; power supply ability; regenerative braking energy; economic analysis

(上接第191页 continued from page 191)

Regulation principle of power flow gradient to multiple characteristic independent variables in UPFC embedded power system

LIU Jinlian¹, XU Zheng¹, YANG Jian¹, ZHANG Zheren¹, SONG Pengcheng²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. National Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China)

Abstract: The power flow gradient or regulation efficiency of UPFC (Unified Power Flow Controller) embedded power system are mainly dominated by the amplitude and phase angle of OSIV (Output Series Inserted Voltage) of UPFC and the phase difference of system. The above three variables are chosen as CIVs (Characteristic Independent Variables) for power flow regulation, and with the actual circuit of UPFC embedded double-end power system as background, the mathematical models of active and reactive power flow gradient for each CIV at different critical points are deduced. Based on the regulation freedom degree and efficiency of system power flow, the regulation characteristics of power flow gradients are analyzed theoretically. A variety of typical system operation conditions are set up, and two types of power flow regulation modes are designed through two types of incremental combinations of OSIV amplitude and phase angle, and several typical regulation scenarios for the phase difference of system are also designed. Finally, the case test and analysis are performed regarding the characteristics of power flow gradients to each CIV at system critical points, and the summarized conclusions are beneficial to coordinate the power flow regulation efficiency and the requirements of system protection and stability comprehensively, making the operation of power grid efficient and stable.

Key words: unified power flow controller; output series inserted voltage; power flow gradient; characteristic independent variables; critical points; system operation conditions

附录
附录 A

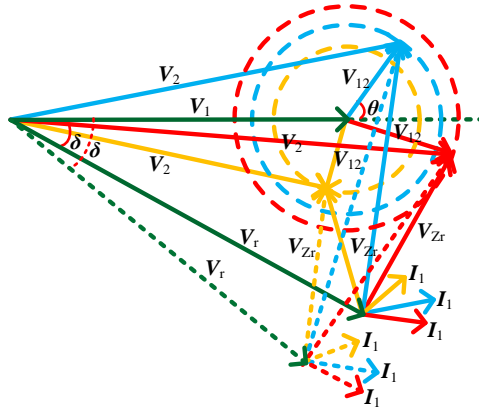


图 A1 含 UPFC 电力系统的各关键变量相量示意图

Fig.A1 Phasor schematic diagram of primary variables in UPFC embedded power system

系统 SCP₁ 处关于每个 CIV 的有功与无功潮流变化率数学模型如式(A1)-(A3)所示。

$$\begin{cases} dP_1 / dV_{12} = V_1 (R_r \cos \theta + X_r \sin \theta) / Z_r^2 \\ dQ_1 / dV_{12} = V_1 (X_r \cos \theta - R_r \sin \theta) / Z_r^2 \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} dP_1 / d\theta = V_1 V_{12} (X_r \cos \theta - R_r \sin \theta) / Z_r^2 \\ dQ_1 / d\theta = -V_1 V_{12} (R_r \cos \theta + X_r \sin \theta) / Z_r^2 \end{cases} \quad (A2)$$

$$\begin{cases} dP_1 / d\delta = V_1 V_r (R_r \sin \delta - X_r \cos \delta) / Z_r^2 \\ dQ_1 / d\delta = V_1 V_r (R_r \cos \delta + X_r \sin \delta) / Z_r^2 \end{cases} \quad (A3)$$

系统 SCP₂ 处关于每个 CIV 的有功与无功潮流变化率数学模型如式(A4)-(A6)所示。

$$\begin{cases} dP_2 / dV_{12} = V_1 (R_r \cos \theta + X_r \sin \theta) / Z_r^2 \\ dQ_2 / dV_{12} = V_1 (X_r \cos \theta - R_r \sin \theta) / Z_r^2 \end{cases} \quad (A4)$$

$$\begin{cases} dP_2 / d\theta = -V_{12} \{V_1 (X_r \cos \theta + R_r \sin \theta) + V_r [R_r \sin(\delta - \theta) - X_r \cos(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \\ dQ_2 / d\theta = -V_{12} \{V_1 (X_r \sin \theta - R_r \cos \theta) + V_r [R_r \cos(\delta - \theta) + X_r \sin(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \end{cases} \quad (A5)$$

$$\begin{cases} dP_2 / d\delta = V_{12} V_r [R_r \sin(\delta - \theta) - X_r \cos(\delta - \theta)] / Z_r^2 \\ dQ_2 / d\delta = V_{12} V_r [R_r \cos(\delta - \theta) + X_r \sin(\delta - \theta)] / Z_r^2 \end{cases} \quad (A6)$$

系统 SCP₃ 处关于每个 CIV 的有功与无功潮流变化率数学模型如式(A7)-(A9)所示。

$$\begin{cases} dP_3 / dV_{12} = \{2R_r (V_{12} + V_1 \cos \theta) - V_r [R_r \cos(\delta - \theta) + X_r \sin(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \\ dQ_3 / dV_{12} = \{2X_r (V_{12} + V_1 \cos \theta) + V_r [R_r \sin(\delta - \theta) - X_r \cos(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \end{cases} \quad (A7)$$

$$\begin{cases} dP_3 / d\theta = -V_{12} \{2V_1 R_r \sin \theta + V_r [R_r \sin(\delta - \theta) - X_r \cos(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \\ dQ_3 / d\theta = -V_{12} \{2V_1 X_r \sin \theta + V_r [R_r \cos(\delta - \theta) + X_r \sin(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \end{cases} \quad (A8)$$

$$\begin{cases} dP_3 / d\delta = V_r \{V_1(R_r \sin \delta - X_r \cos \delta) + V_{12}[R_r \sin(\delta - \theta) - X_r \cos(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \\ dQ_3 / d\delta = V_r \{V_1(R_r \cos \delta + X_r \sin \delta) + V_{12}[R_r \cos(\delta - \theta) + X_r \sin(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \end{cases} \quad (A9)$$

系统 SCP₄ 处关于每个 CIV 的有功与无功潮流变化率数学模型如式(A10)-(A12)所示。

$$\begin{cases} dP_4 / dV_{12} = V_r [R_r \cos(\delta - \theta) - X_r \sin(\delta - \theta)] / Z_r^2 \\ dQ_4 / dV_{12} = V_r [R_r \sin(\delta - \theta) + X_r \cos(\delta - \theta)] / Z_r^2 \end{cases} \quad (A10)$$

$$\begin{cases} dP_4 / d\theta = V_{12} V_r [R_r \sin(\delta - \theta) + X_r \cos(\delta - \theta)] / Z_r^2 \\ dQ_4 / d\theta = V_{12} V_r [X_r \sin(\delta - \theta) - R_r \cos(\delta - \theta)] / Z_r^2 \end{cases} \quad (A11)$$

$$\begin{cases} dP_4 / d\delta = -V_r \{V_1(X_r \cos \delta + R_r \sin \delta) + V_{12}[X_r \cos(\delta - \theta) + R_r \sin(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \\ dQ_4 / d\delta = -V_r \{V_1(X_r \sin \delta - R_r \cos \delta) + V_{12}[X_r \sin(\delta - \theta) - R_r \cos(\delta - \theta)]\} / Z_r^2 \end{cases} \quad (A12)$$

附录 B

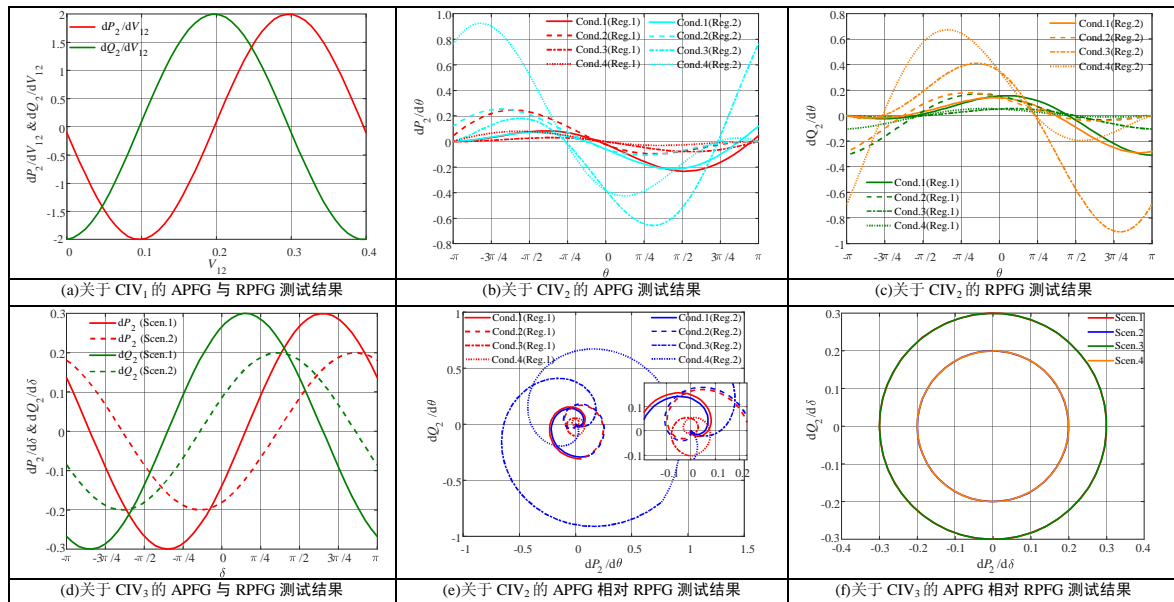


图 B1 SCP₂ 处的关于每个 CIV 的 PFG 测试结果

Fig.B1 Test results of PFG to each CIV at SCP₂

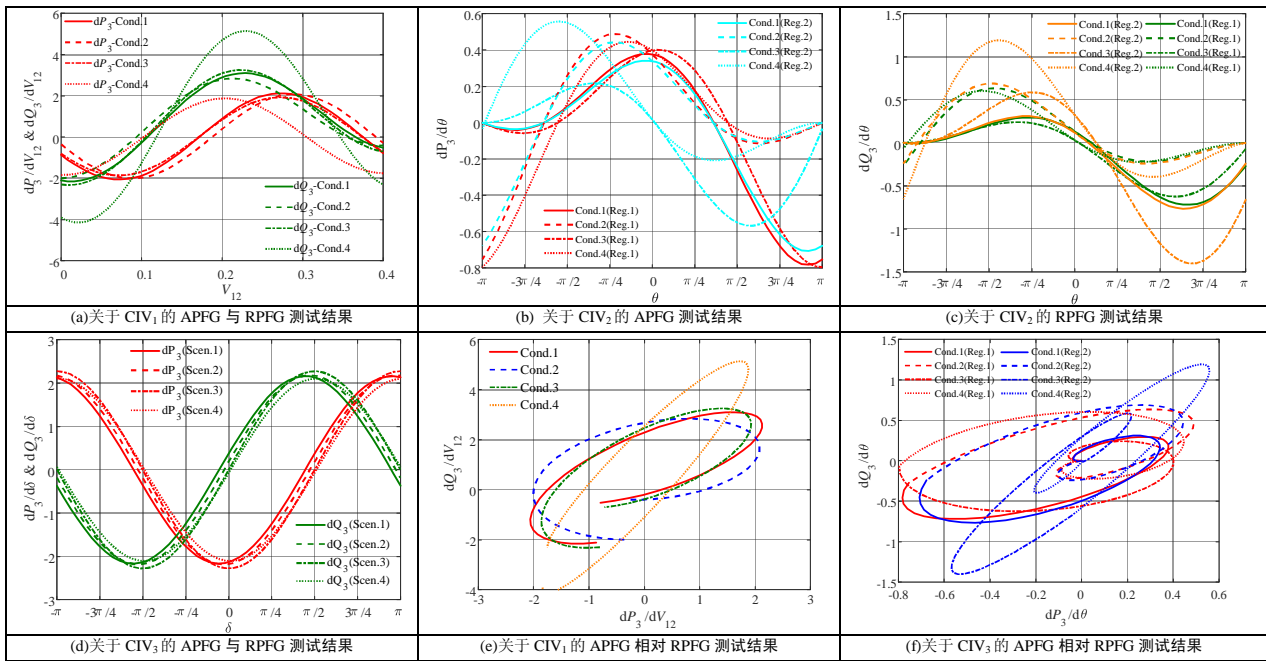


图 B2 SCP₃ 处的关于每个 CIV 的 PFG 测试结果
Fig.B2 Test results of PFG to each CIV at SCP₃

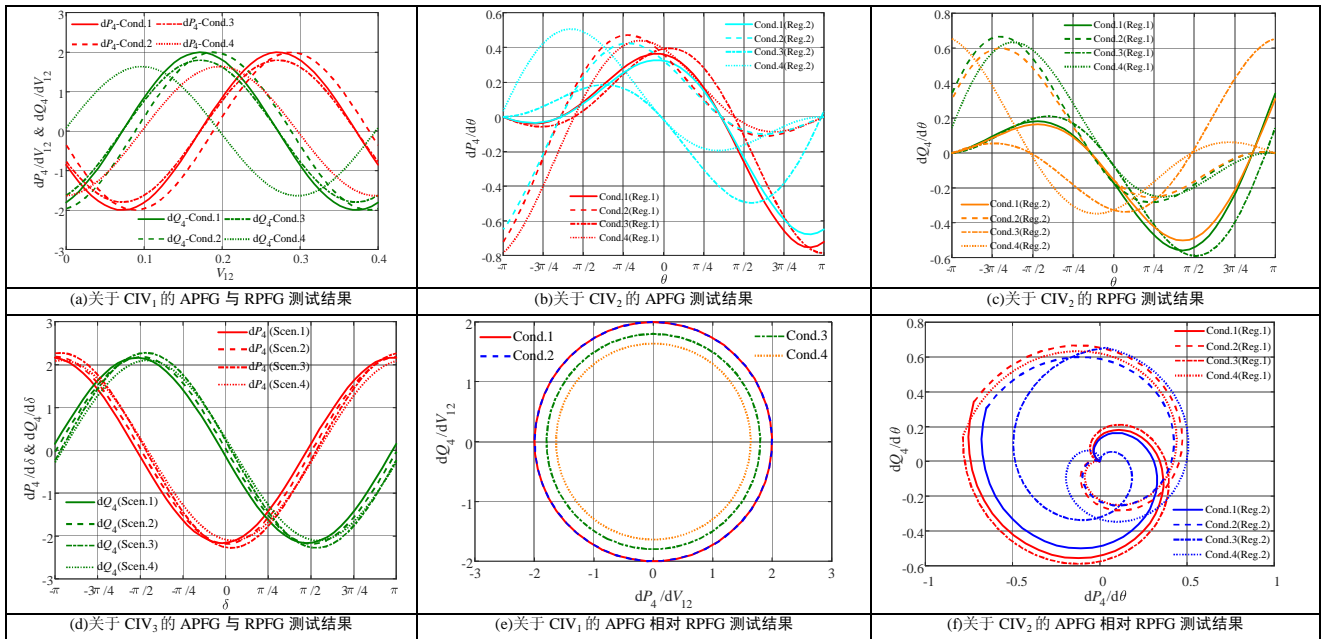


图 B3 SCP₄ 处的关于每个 CIV 的 PFG 测试结果
Fig.B3 Test results of PFG to each CIV at SCP₄