

DOI:10.12158/j.2096-3203.2023.01.001

一种配电网多线路混合式统一潮流控制器

袁佳歆¹, 许顺凯^{1,2}, 余梦泽³, 梅佳骏⁴, 张伟哲¹, 杨欣宜¹

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 3. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510080; 4. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为适应配电网多线路的潮流调节需求,进一步提高潮流调控能力和响应速度,文中提出一种新型配电网多线路混合式统一潮流控制器(multi-line hybrid unified power flow controller for distribution network, D-MHUPFC)。D-MHUPFC由Sen变压器、统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)和混合式有载分接开关组成,能够快速调节配电网多线路潮流。相较于传统调节方式,D-MHUPFC具有结构紧凑、响应快速、经济性好和可靠性高等优点。文中结合ZIP负荷模型,推导计及D-MHUPFC的多线路潮流方程,优化其协同控制策略,并搭建10 kV配电网仿真平台验证其可行性。结果显示,D-MHUPFC及其控制策略能在0.15 s内快速调节多线路潮流,转移过载功率,提高断面输电极限。D-MHUPFC能够解耦控制有功功率和无功功率,补偿误差小于1%,具有和UPFC相当的潮流调节能力。

关键词:Sen变压器;统一潮流控制器(UPFC);配电网多线路混合式统一潮流控制器(D-MHUPFC);多线路;潮流调节;快速切换

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)01-0002-09

0 引言

当今世界就发展低碳经济和建设生态文明达成共识。可再生能源将成为电网建设的重要组成部分^[1-2],而配电网与分布式电源缺乏统一规划,配电网存在消纳能力不足的问题,迫切需要有效的潮流调节手段挖掘现有网架输配电能力,提高供电安全可靠^[3]。

以往多采用调压变压器和有载调压分接头(on-load tap changer, OLTC)实现线路潮流调节^[4-5],但调节速度较慢,产生的电弧影响装置寿命,同时影响系统有功和无功^[6-7]。文献[8]提出混合式开关替代OLTC,可以提高响应速度,消除电弧。

柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)可以在不改变电网运行方式和注入模式的条件下调节潮流,提高电网输配电能力^[9-12]。其中,统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)基于电压源换流器(voltage source converter, VSC),对输电线路注入一个幅值和相位独立可调的补偿电压,快速调节线路潮流,是功能最强大的FACTS装置^[13-14],但存在成本高昂、损耗较大和谐波等问题。

FACTS装置的另一类代表是电磁式潮流控制

器,以多绕组变压器为基础,通过改变绕组抽头位置,使其注入不同幅值和相位的补偿电压,达到调节线路潮流的目的,具有可靠性高、损耗小和造价较低等显著优点^[9,12]。电磁式潮流控制器的典型代表为Sen变压器(Sen transformer, ST)^[15-17]。文献[18-19]指出UPFC的造价和运行成本分别是ST的5倍和10倍。

文献[20]提出一种电磁混合式潮流控制器(electromagnetic hybrid power flow controller, EHPFC),该潮流控制器由大容量的ST与小容量的UPFC组合而成。EHPFC在实现360°连续精准补偿的基础上,大幅减少制造成本,但主要调节过程仍采用机械式开关,响应较慢。此外,ST、UPFC以及EHPFC只适用于独立调节一条线路的有功和无功,配电网有多条相邻传输线路,安装多套装置会增加励磁单元复杂度,设备容量利用率较低^[21]。

基于此,文中提出一种配电网多线路混合式统一潮流控制器(multi-line hybrid unified power flow controller for distribution network, D-MHUPFC)。D-MHUPFC由ST和UPFC组成,档位切换部分由混合式有载分接开关(hybrid on-load tap changer, HOLTC)完成。文中重点分析D-MHUPFC的工作原理、技术特性和经济性,针对其潮流调控数学模型和控制策略开展研究,并搭建基于配电网的Matlab/Simulink仿真平台,验证了D-MHUPFC的可行性和有效性。

收稿日期:2022-07-07;修回日期:2022-09-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902904);中国南方电网有限责任公司科技项目(037700KK52190009)

1 D-MHUPFC 的基本原理

1.1 D-MHUPFC 的本体结构

D-MHUPFC 为一个包含一、二次设备的系统,由大容量 ST 和小容量 UPFC 构成,两者的一次侧共用励磁绕组。开关部分由 HOLTIC 组成,能够实现跨档位快速调节。其中 UPFC 由 2 个共用直流母线电容的 VSC 构成,电容电压为 \dot{U}_{DC} 。VSC 由绝缘栅双极晶体管(S_1 — S_8)构成,在每个 VSC 的上下桥臂间分别引线与耦合变压器二次侧相连。

D-MHUPFC 的调节功能主要由二次侧完成,ST 的二次绕组 (a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_{21} 、 a_{22} 、 a_{23} 、 b_{11} 、 b_{12} 、 b_{13} 、 b_{21} 、 b_{22} 、 b_{23} 、 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} 、 c_{21} 、 c_{22} 、 c_{23}) 和 UPFC 的串联侧 (d_{11} 、 d_{12} 、 d_{13} 、 d_{21} 、 d_{22} 、 d_{23}) 通过隔离变压器向输电线路注入补偿电压 \dot{U}_{MH} (如 D-MHUPFC 串联侧补偿线路 1 的 A 相则命名为 \dot{U}_{MHA1} , 以此类推)。设 \dot{U}_{sA} 、 \dot{U}_{sB} 、 \dot{U}_{sC} 分别为主线路三相首端电压,安装 D-MHUPFC 后,线路 1 首端三相电压变为 \dot{U}_{sA1} 、 \dot{U}_{sB1} 、 \dot{U}_{sC1} , 线路 2 首端三相电压变为 \dot{U}_{sA2} 、 \dot{U}_{sB2} 、 \dot{U}_{sC2} 。D-MHUPFC 的三相结构如图 1 所示,其中 A 相结构如图 2 所示。

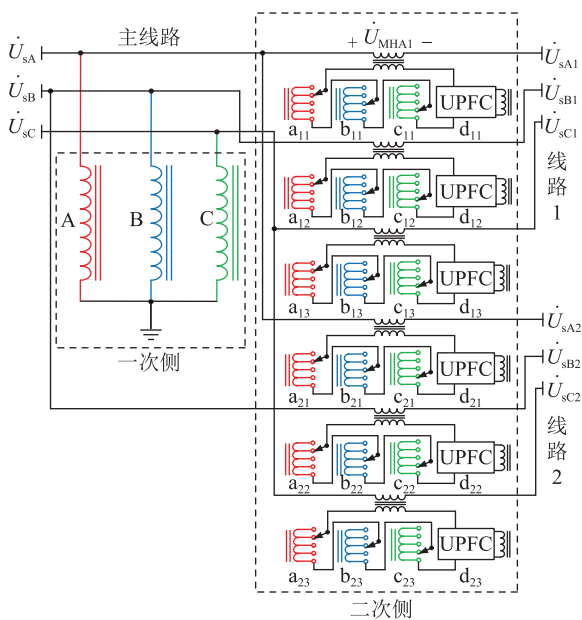


图 1 D-MHUPFC 的三相结构

Fig.1 Three-phase structure of D-MHUPFC

1.2 HOLTIC 的拓扑

以二次绕组 a_{11} 为例,档位切换由机械载流开关和反并联晶闸管组成的 HOLTIC 完成。正常运行时,电流经机械载流开关流通,当要进行档位切换时,利用反并联晶闸管辅助切换。

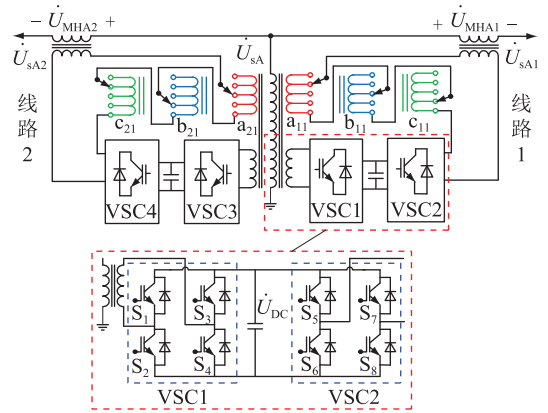


图 2 D-MHUPFC 的 A 相结构

Fig.2 A-phase structure of D-MHUPFC

图 3 为 HOLTIC 拓扑,其中 R_m 为第 m 级开关的限流电阻,为反并联晶闸管 K_m 提供正向电压; S_{2m-1} 为第 m 级开关电阻支路的机械开关; S_{2m} 为第 m 级开关晶闸管支路的机械开关。电阻支路和晶闸管支路都安装了电流检测模块,并连接至控制单元。相较于传统机械式开关,HOLTIC 可实现跨档位快速切换,提高系统整体响应速度。且晶闸管支路主要起辅助换流作用,导通时间较短,温升和损耗较小,开关部分无需冷却设备,因此结构更加紧凑^[7-8]。

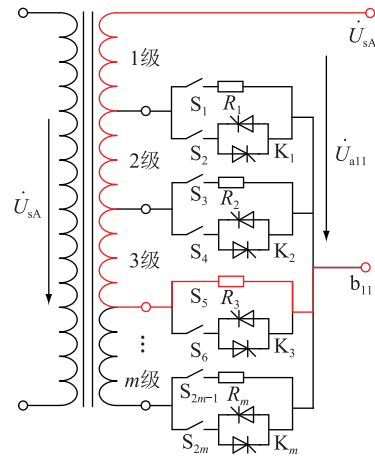


图 3 HOLTIC 拓扑

Fig.3 Topology of HOLTIC

2 D-MHUPFC 的工作特性

2.1 输出电压相量

以线路 1 的 A 相为例,D-MHUPFC 的 ST 部分采用 Yd11 连接组别,则一次侧电压 \dot{U}_{sA} 与二次侧绕组 a_{11} 的补偿电压 \dot{U}_{a11} 相差 30° 。当 D-MHUPFC 的二次侧绕组抽头 (a_{11} 、 b_{11} 、 c_{11}) 在 (2, 0, 1) 级调节时,输出的补偿电压相量如图 4 所示。其中 θ_{MH-ST} 为 ST 部分补偿前后首端相电压的相位差; \dot{U}_{sTA1} 为系统 ST 部分的补偿电压; k_a 、 k_b 、 k_c 分别为二次侧边绕组 a_{11} 、

b_{11} 、 c_{11} 的调节级数; \dot{U}_{a11} 、 \dot{U}_{b11} 、 \dot{U}_{c11} 分别为二次侧绕组 a_{11} 、 b_{11} 、 c_{11} 注入线路的补偿电压。

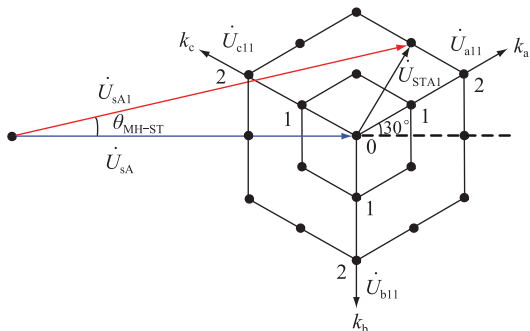


图4 D-MHUPFC 中 ST 补偿时的电压调节范围

Fig.4 Voltage regulation range during ST compensation in D-MHUPFC

当 D-MHUPFC 的二次侧绕组抽头在(0,1,2,3)级调节时,可输出 37 个离散的补偿电压点(包含零点)。以此类推,当二次侧绕组抽头在(0,1,2, ..., m)级可调时,D-MHUPFC 的 ST 部分可输出电压调节量的个数为 $M=3m^2+3m+1$ 。

ST 部分接入电力系统后,线路 1 的 A 相首端电压为:

$$\dot{U}_{sA1} = \dot{U}_{sA} + k_a \dot{U}_{a11step} + k_b \dot{U}_{b11step} + k_c \dot{U}_{c11step} \quad (1)$$

式中: $k_a, k_b, k_c = 0, 1, 2, \dots, m$; $\dot{U}_{a11step}$ 、 $\dot{U}_{b11step}$ 、 $\dot{U}_{c11step}$ 分别为二次侧绕组 a_{11} 、 b_{11} 、 c_{11} 的每级电压调节量。

当 D-MHUPFC 中 UPFC 部分共同参与调节时, ST 的补偿电压 \dot{U}_{STa1} 与 UPFC 的补偿电压 \dot{U}_{UPFCA1} 共同组成 A 相补偿电压 \dot{U}_{MHA1} , 如图 5 所示, 其中 θ_{MH} 为补偿前后首端相电压的相位差。以线路 1 的 A 相为例, D-MHUPFC 接入系统后, 线路 1 首端电压表达式为:

$$\dot{U}_{sA1} = \dot{U}_{sA} + \dot{U}_{STa1} + \dot{U}_{UPFCA1} = \dot{U}_{sA} + \dot{U}_{MHA1} \quad (2)$$

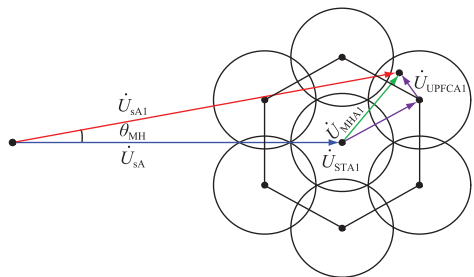


图5 D-MHUPFC 的电压调节范围

Fig.5 Voltage regulation range of D-MHUPFC

以二次侧抽头在 0~1 级调节为例, 当 ST 和 UPFC 相互配合时, 两者输出电压叠加成为 \dot{U}_{MHA1} , 即 D-MHUPFC 的电压调节范围为图 5 中小圆覆盖的所有区域, 并且是连续调节的。

2.2 ST 与 UPFC 的容量配合

为了使 UPFC 的电压调节范围覆盖 ST 不能补偿的区域, 又尽可能减小 UPFC 部分的容量, UPFC 的 3 个相邻圆形补偿区域相交于同一点时在数学角度最优, UPFC 与 ST 的电压关系如图 5 所示, 数学推导如式(3)所示。

$$\begin{cases} U_{UPFCmax} = U_{step} / \sqrt{3} \\ U_{step} = U_{STmax} / m \\ K_a = \frac{S_{UPFC}}{S_{ST}} = \frac{U_{UPFCmax}}{U_{STmax}} = 1 / (\sqrt{3}m) \\ K_{ST} = \frac{S_{ST}}{S_{D-MHUPFC}} = \frac{\sqrt{3}m}{\sqrt{3}m + 1} \\ K_{UPFC} = \frac{S_{UPFC}}{S_{D-MHUPFC}} = \frac{1}{\sqrt{3}m + 1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U_{UPFCmax}$ 为 UPFC 串联侧输出的最大电压幅值; U_{step} 为每级电压调节量; U_{STmax} 为 ST 二次侧绕组的最大输出电压; K_a 为 UPFC 和 ST 的容量比; S_{UPFC} 为 UPFC 部分的容量; S_{ST} 为 ST 部分的容量; K_{ST} 为 ST 的容量比例; $S_{D-MHUPFC}$ 为 D-MHUPFC 的容量; K_{UPFC} 为 UPFC 的容量比例。

随着调节级数的增加, K_a 、 K_{ST} 、 K_{UPFC} 的变化如表 1 所示。

表 1 ST 和 UPFC 占总容量的比例

Table 1 Proportion of ST and UPFC in total capacity %			
调节级数	K_a	K_{ST}	K_{UPFC}
1	57.7	63.4	36.6
2	28.9	77.6	22.4
3	19.3	83.9	16.1
⋮	⋮	⋮	⋮
8	7.2	93.3	6.7

随着调节级数的增加, UPFC 的容量占比逐渐减小, 具体应根据工程实际选取。以文献[21]的 230 kV/220 MV·A 移相变压器为例, 若 D-MHUPFC 同样采用 ± 8 级可调, UPFC 的容量占比将降低至 6.7%, 大幅降低制造成本 F 和功率损耗 P_{sim} 。

2.3 D-MHUPFC 与 ST、UPFC 的对比

以调节级数 1 级为例, 令 ST 部分的补偿电压 U_{MH-ST} 相同, 3 种调节方式可达到的最大移相角分别为 θ_{ST}^m 、 θ_{UPFC}^m 、 $\theta_{D-MHUPFC}^m$, 如图 6 所示。

设系统首端电压 \dot{U}_{sA} 为基准电压, U_{MH-ST} 分别取 0.10 p.u.、0.15 p.u.、0.20 p.u.、0.25 p.u. 时, ST、UPFC 和 D-MHUPFC 的移相角 θ_{ST} 、 θ_{UPFC} 、 $\theta_{D-MHUPFC}$ 范围如表 2 所示。

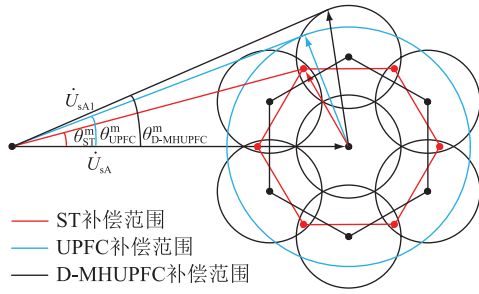


图6 ST、UPFC、D-MHUPFC的最大移相角

Fig.6 Maximum phase shift angle of ST, UPFC, D-MHUPFC

表2 ST、UPFC、D-MHUPFC的移相角范围

Table 2 Phase shift angle range of ST, UPFC, D-MHUPFC

$U_{MH-ST}/p.u.$	$\theta_{ST}/(^{\circ})$	$\theta_{UPFC}/(^{\circ})$	$\theta_{D-MHUPFC}/(^{\circ})$
0.10	-5.20~5.20	-8.34~8.34	-9.00~9.00
0.15	-8.00~8.00	-12.56~12.56	-13.44~13.44
0.20	-10.90~10.90	-16.86~16.86	-17.81~17.81
0.25	-13.89~13.89	-21.25~21.25	-22.09~22.09

在小容量 UPFC 的配合下, D-MHUPFC 移相角范围相较 ST 提升很多, 并且在降低制造成本的前提下比 UPFC 的调节范围更大一些, 结合线路潮流公式^[20-21]可知, D-MHUPFC 的潮流调节范围最大。

在投资效益方面, 结合文献[18, 22], ST 的制造成本 F_{ST} 约 15 万元/(MV·A), 运行效率 η_{ST} 可达到 99%, 将运行效率 η 定义为 $(1 - P_{sun}) \times 100\%$ 。以脉冲宽度调制控制和可关断晶闸管 (gate turn-off thyristor, GTO) 构成的 VSC 为参照, UPFC 的制造成本 $F_{UPFC(GTO)}$ 约 75 万元/(MV·A), 运行效率 $\eta_{UPFC(GTO)}$ 约 92%。结合苏南 500 kV UPFC 示范工程^[23], 基于模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 的 UPFC 运行效率 $\eta_{UPFC(MMC)}$ 约 99%, 制造成本 $F_{UPFC(MMC)}$ 约 125 万元/(MV·A)。考虑到 D-MHUPFC 采用 HOLTC 改造, 根据 EPRI-TR-105186 报告, 开关改造费用 F_{gz} 约为 10 万元/(MV·A)。D-MHUPFC 的制造成本 $F_{D-MHUPFC}$ 及运行效率 $\eta_{D-MHUPFC}$ 如表 3 所示, 其计算见式(4)。

表3 D-MHUPFC的制造成本及运行效率

Table 3 Cost and operating efficiency of D-MHUPFC

调节级数	制造成本 $F/$ [万元·(MV·A) ⁻¹]		运行效率 $\eta/\%$	
	UPFC(GTO)	UPFC(MMC)	UPFC(GTO)	UPFC(MMC)
1	43.3	61.6	96.4	99.0
2	36.2	47.4	97.4	99.0
3	33.1	41.1	97.9	99.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8	28.4	31.7	98.5	99.0

$$\begin{cases} F_{D-MHUPFC} = K_{ST}(F_{ST} + F_{gz}) + K_{UPFC}F_{UPFC} \\ \eta_{D-MHUPFC} = K_{ST}\eta_{ST} + K_{UPFC}\eta_{UPFC} \end{cases} \quad (4)$$

当调节级数为 8 时, D-MHUPFC 在略优于 UPFC 潮流调节能力的前提下, 制造成本约为 UPFC 的 25%~40%, 运行效率约 99%, 运行成本和占地面积也相应减小^[18-20]。表 4 对比了 ST、UPFC 和 D-MHUPFC 的技术特性, 结合调节效果和投资效益等可知, D-MHUPFC 的综合技术经济性最优。

表4 ST、UPFC和D-MHUPFC的技术特性对比

Table 4 Comparison of technical characteristics of ST, UPFC and D-MHUPFC

技术特性	ST	UPFC	D-MHUPFC
潮流调节能力	较弱	强	强
无功补偿能力	无	强	较强
响应速度	秒级	毫秒级	毫秒级
制造成本	较低	很高	中等
功率损耗	<1%	1%~8%	<2%
运行效率	99%	92%~99%	99%
连续调节	无	有	有
补偿精度	较差	很高	很高
可靠性	高	较低	较高
装设容量	大	较低	中等

3 D-MHUPFC 的控制策略

3.1 考虑 D-MHUPFC 的潮流方程

将 D-MHUPFC 安装在线路 1 和线路 2 首端, 结合调节功能可等效为 1 个并联电压源 \dot{U}_c 和 2 个串联电压源 \dot{U}_{1c} 和 \dot{U}_{2c} , 等效电路如图 7 所示。

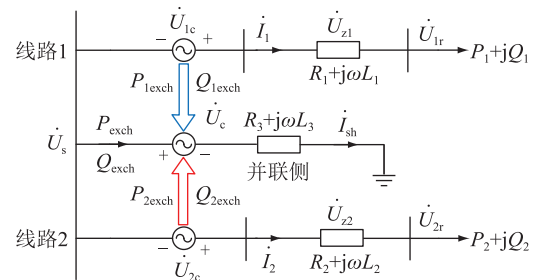


图7 D-MHUPFC接入系统的等效电路

Fig.7 Equivalent circuit of the system after D-MHUPFC access

图 7 中, \dot{U}_s 为主线路首端电压; Z_1 、 Z_2 分别为线路 1 和线路 2 的线路阻抗, 两者的端电压分别为 \dot{U}_{z1} 、 \dot{U}_{z2} ; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为线路 1、线路 2、主线路电阻; L_1 、 L_2 、 L_3 分别为线路 1、线路 2、主线路电感; \dot{U}_{1r} 、 \dot{U}_{2r} 分别为线路 1 和线路 2 的末端实际电压; \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 分别为流过线路 1 和线路 2 的电流; \dot{I}_{sh} 为并

联侧注入电流; $P_{\text{exch}}、Q_{\text{exch}}$ 分别为 D-MHUPFC 与主线路的交换有功功率和无功功率; $P_{1\text{exch}}、P_{2\text{exch}}$ 分别为线路 1 和线路 2 补偿单元与并联侧交换有功功率; $Q_{1\text{exch}}、Q_{2\text{exch}}$ 分别为线路 1 和线路 2 补偿单元与并联侧交换无功功率; $P_1+jQ_1、P_2+jQ_2$ 分别为线路 1、线路 2 末端输出功率。D-MHUPFC 正常工作时,有:

$$\begin{cases} P_{\text{exch}} = P_{1\text{exch}} + P_{2\text{exch}} \\ Q_{\text{exch}} = Q_{1\text{exch}} + Q_{2\text{exch}} \end{cases} \quad (5)$$

文中就线路 1 和线路 2 末端输出功率采用基于电压静态特性的 ZIP 负荷模型,并通过忽略高阶二次项得到线性表达式,具体如下:

$$\begin{cases} P_1(V_{1r}) = (2A_{1P} + B_{1P})V_{1r} + (C_{1P} - A_{1P}) \\ P_2(V_{2r}) = (2A_{2P} + B_{2P})V_{2r} + (C_{2P} - A_{2P}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_1(V_{1r}) = (2A_{1Q} + B_{1Q})V_{1r} + (C_{1Q} - A_{1Q}) \\ Q_2(V_{2r}) = (2A_{2Q} + B_{2Q})V_{2r} + (C_{2Q} - A_{2Q}) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} V_{1r} = U_{1r}/U_{1r0} \\ V_{2r} = U_{2r}/U_{2r0} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $U_{1r0}、U_{2r0}$ 分别为线路 1、线路 2 的末端基准电压; $A_{1P}、A_{2P}$ 分别为线路 1、线路 2 有功的恒阻抗比例系数; $A_{1Q}、A_{2Q}$ 分别为线路 1、线路 2 无功的恒阻抗比例系数; $B_{1P}、B_{2P}$ 分别为线路 1、线路 2 有功的恒电流比例系数; $B_{1Q}、B_{2Q}$ 分别为线路 1、线路 2 无功的恒电流比例系数; $C_{1P}、C_{2P}$ 分别为线路 1、线路 2 有功的恒功率比例系数; $C_{1Q}、C_{2Q}$ 分别为线路 1、线路 2 无功的恒功率比例系数。

当线路功率发生变化时,对有功功率变化相对不敏感的线路应承担更多的功率变化。设线路 1 对有功功率变化的灵敏系数较大,即 $2A_{1P}+B_{1P}>2A_{2P}+B_{2P}$,令功率灵敏系数比值为 K ,则有:

$$K = \frac{2A_{1P} + B_{1P}}{2A_{2P} + B_{2P}} \quad (9)$$

当线路出力变化 $\Delta P+j\Delta Q$ 时,线路 1 和线路 2 末端输出功率分别为:

$$P_1 + jQ_1 = P_{10} + jQ_{10} + \frac{K}{1+K}(\Delta P + j\Delta Q) \quad (10)$$

$$P_2 + jQ_2 = P_{20} + jQ_{20} + \frac{1}{1+K}(\Delta P + j\Delta Q) \quad (11)$$

式中: $P_{10}、Q_{10}$ 分别为线路 1 末端为基准电压时的有功功率和无功功率; $P_{20}、Q_{20}$ 分别为线路 2 末端为基准电压时的有功功率和无功功率。

结合式(6)一式(11)可得线路 1 和线路 2 的末端电压幅值为:

$$U_{1r} = \frac{P_{10} + \Delta P_1 + A_{1P} - C_{1P}}{2A_{1P} + B_{1P}} U_{1r0} \quad (12)$$

$$U_{2r} = \frac{P_{20} + \Delta P_2 + A_{2P} - C_{2P}}{2A_{2P} + B_{2P}} U_{2r0} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta P_1 = K\Delta P/(1+K) \\ \Delta P_2 = \Delta P/(1+K) \end{cases} \quad (14)$$

根据功率公式,可分别计算得到电流为:

$$i_1 = \frac{P_{10} + \Delta P_1 - j(Q_{10} + \Delta Q_1)}{U_{1r}} \quad (15)$$

$$i_2 = \frac{P_{20} + \Delta P_2 - j(Q_{20} + \Delta Q_2)}{U_{2r}} \quad (16)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta Q_1 = K\Delta Q/(1+K) \\ \Delta Q_2 = \Delta Q/(1+K) \end{cases} \quad (17)$$

结合式(12)一式(17),可计算得出 D-MHUPFC

在线路 1 的串联补偿电压 \dot{U}_{1c} 为:

$$\dot{U}_{1c} = \left[\frac{K\Delta P + F}{G} U_{1r0} + H \frac{K\Delta P + (1+K)P_{10}}{K\Delta P + T} - U_s \right] - jH \frac{K\Delta Q + (1+K)Q_{10}}{K\Delta P + T} \quad (18)$$

式中: $F、G、H、T$ 为系统基准参数。其表达式分别为:

$$\begin{cases} F = (1+K)(P_{10} + A_{1P} - C_{1P}) \\ G = (1+K)(2A_{1P} + B_{1P}) \\ H = (R_1 + j\omega L_1)(2A_{1P} + B_{1P})/U_{1r0} \\ T = (1+K)(P_{10} + A_{1P} - C_{1P}) \end{cases} \quad (19)$$

式(19)为系统初始状态即可计算得出的基准

参数,电压 \dot{U}_{2c} 的幅值和相位同理可得。因此,当线路功率变化 $\Delta P+j\Delta Q$ 时,可根据式(18),快速计算出 D-MHUPFC 的补偿电压 \dot{U}_{1c} 和 \dot{U}_{2c} 。除此之外, D-MHUPFC 还可通过将功率从过载线路转移到轻载线路,提高网络断面输配电能力。此时, D-MHUPFC 的交换功率为:

$$\begin{cases} P_{1\text{exch}} + P_{2\text{exch}} = 0 \\ Q_{1\text{exch}} + Q_{2\text{exch}} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

3.2 D-MHUPFC 的抽头投切控制策略

图 8 为 D-MHUPFC 的抽头投切位置,虚线圆放大后,将临近 \dot{U}_{ref} 的 4 个抽头位置点分别标记为点 1、2、3、4。其中, \dot{U}_{ref} 为计算得出的 D-MHUPFC 理想补偿电压, β 为其对应的相角,设 $30^\circ < \beta \leq 150^\circ$ 为第一象限, $150^\circ < \beta \leq 270^\circ$ 为第二象限, $-90^\circ < \beta \leq 30^\circ$ 为第三象限。将 \dot{U}_{ref} 到 4 个电压点的距离分别记为

r_1, r_2, r_3, r_4 , 表示补偿电压 \dot{U}_i 与 \dot{U}_{ref} 之间的误差大小。

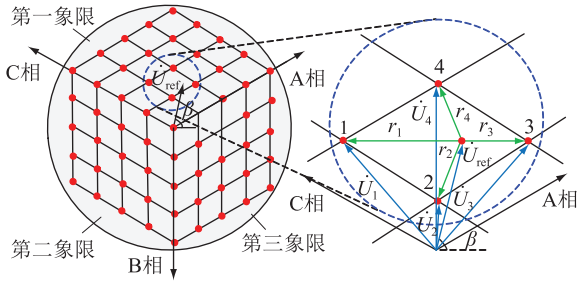


图8 D-MHUPFC的抽头投切位置

Fig.8 Tap switching position of D-MHUPFC

D-MHUPFC 的 ST 部分补偿电压点是离散的, 输出的实际补偿电压 $\dot{U}_i (i=1, 2, 3, 4)$ 应尽可能接近理想补偿电压 \dot{U}_{ref} 。同时, 由于线路电压变化导致的 2 条线路功率变化量总和 $\Delta P_r, \Delta Q_r$ 与线路初始变化量 $\Delta P_1, \Delta Q_1$ 的误差也应尽可能减小。

从补偿电压点和线路初始变化量这两部分误差, 分析 D-MHUPFC 的抽头投切控制策略。

首先, 计算 r_1, r_2, r_3, r_4 中幅值最小的投切点作为实际补偿点, 将 \dot{U}_{ref} 在坐标系中分解成 \dot{U}_{refx} 和 \dot{U}_{refy} , 将 \dot{U}_i 也分解成 \dot{U}_{ix} 和 \dot{U}_{iy} , 则抽头投切点 i 对应的实际补偿电压 \dot{U}_i 与 \dot{U}_{ref} 的误差大小为:

$$\varepsilon_{Ki} = \sqrt{(U_{refx} - U_{ix})^2 + (U_{refy} - U_{iy})^2} \quad (21)$$

通过式 (21) 计算得到最小误差 ε_{Kmin} , 其对应投切点的抽头设置参数设为第 I 组设置参数, 其他投切点的抽头设置参数根据误差大小分别设为第 II、III、IV 组设置参数。

基于第 I 组设置参数, D-MHUPFC 输出补偿电压后, 计算 2 条线路的功率变化量分别为 $\Delta P_{r1}, \Delta Q_{r1}$ 和 $\Delta P_{r2}, \Delta Q_{r2}$, 此时 2 条线路均使用第 I 组抽头设置参数。2 条线路的功率变化量之和为:

$$\Delta P_{r-1} = \Delta P_{r1} + \Delta P_{r2} \quad (22)$$

$$\Delta Q_{r-1} = \Delta Q_{r1} + \Delta Q_{r2} \quad (23)$$

$\Delta P_{r-1}, \Delta Q_{r-1}$ 与主线路初始变化量 $\Delta P_1, \Delta Q_1$ 相减可得基于第 I 组设置参数的线路功率调节误差量:

$$\varphi_{P-I} = \Delta P_{r-1} - \Delta P_1 \quad (24)$$

$$\varphi_{Q-I} = \Delta Q_{r-1} - \Delta Q_1 \quad (25)$$

假设 2 条线路参数相同, 当线路 1 选用第 I 组设置参数进行调节时, 线路 2 选用第 II、III、IV 组设置参数进行调节, 分别计算这 3 组抽头设置参数下的有功功率调节误差 φ_P 和无功功率调节误差 φ_Q , 记为 $\varphi_{P-II}, \varphi_{P-III}, \varphi_{P-IV}$ 和 $\varphi_{Q-II}, \varphi_{Q-III}, \varphi_{Q-IV}$ 。比较 4 组抽头设置参数下误差的大小, 选取功率调节误差最小的 1 组作为最优抽头设置参数。

3.3 D-MHUPFC 的 UPFC 控制策略

D-MHUPFC 中小容量 UPFC 的控制策略框图如图 9 所示^[24]。图 9 中, P_s, Q_s 分别为线路有功、无功潮流实测值; P_{ref}, Q_{ref} 分别为线路有功、无功潮流目标值; U_p, U_d 分别为 UPFC 串联侧输出电压 \dot{U}_{UPFC} 的横分量和纵分量; U_{UPFC} 为 \dot{U}_{UPFC} 的幅值; U_{dc}, U_{dref} 分别为 UPFC 直流侧电容电压的实测值和目标值; \dot{U}_{sref} 为系统首端电压目标值; I_p, I_d 分别为 UPFC 并联侧注入电流 \dot{I}_{sh} 的横分量和纵分量; θ_{sh} 为 \dot{I}_{sh} 的相角; I_{sh} 为 \dot{I}_{sh} 的幅值。

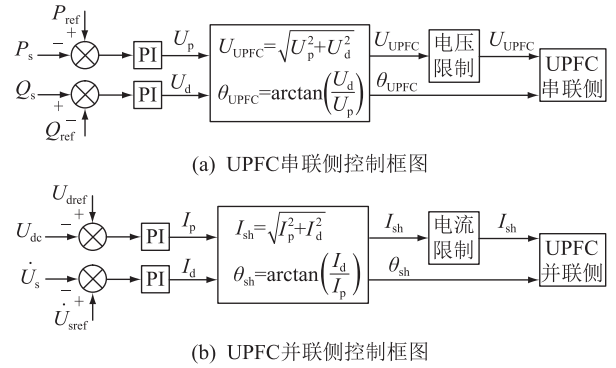


图9 UPFC 控制策略框图

Fig.9 Block diagram of UPFC control strategy

3.4 D-MHUPFC 的协同控制

结合潮流方程以及 ST 和 UPFC 的控制策略, D-MHUPFC 的协同控制流程如图 10 所示, 通过大容量 ST 配合小容量 UPFC 实现对线路潮流的精准调节, 并采用闭环控制。

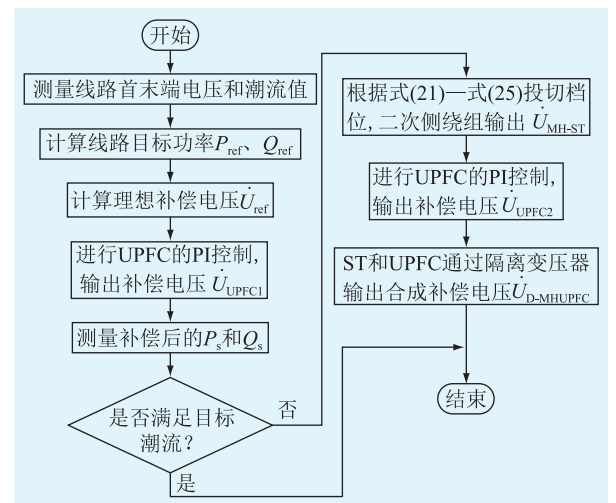


图10 D-MHUPFC 的协同控制

Fig.10 Cooperative control of D-MHUPFC

4 仿真分析

根据图 1、图 3 的拓扑和图 7 的输电线路等效

结构,文中搭建了 10 kV 配电网仿真平台开展试验,各参数设置如表 5 所示。

表 5 仿真模型参数
Table 5 Parameters of simulation model

参数	数值	参数	数值
\dot{U}_s/kV	$10 \angle 0^\circ$	Z_1/Ω	$1.9+j4.71$
\dot{U}_{1r}/kV	$10 \angle -30^\circ$	Z_2/Ω	$1.9+j4.71$
\dot{U}_{2r}/kV	$10 \angle -15^\circ$	U_{STmax}/kV	3.000
电源内阻抗/ Ω	$0.89+j5.21$	$U_{UPFCmax}/kV$	0.375
ST 调节级数	0~4		

D-MHUPFC 的控制策略如第 3 章所述。其中,线路 1 的有功功率 P_1 和无功功率 Q_1 初始值分别为 9.98 MW 和 -1.3 Mvar,线路 2 的有功功率 P_2 和无功功率 Q_2 初始值分别为 4.91 MW 和 -1.2 Mvar。

为了验证 D-MHUPFC 能够灵活调节线路潮流,文中设置 4 个潮流调节目标,分别进行仿真验证。

(1) $P_{ref1} = 12$ MW, $Q_{ref1} = -1.3$ Mvar, 仅调节线路 1 的有功功率,如图 11 所示。

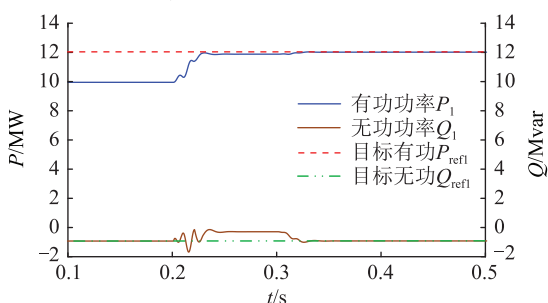


图 11 仅调节线路 1 的有功功率

Fig.11 Only adjust active power of line 1

(2) $P_{ref2} = 9.98$ MW, $Q_{ref2} = -0.65$ Mvar, 仅调节线路 1 的无功功率,如图 12 所示。

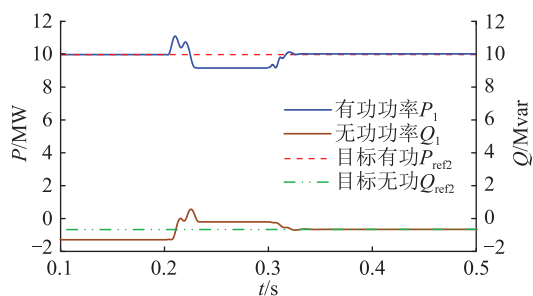


图 12 仅调节线路 1 的无功功率

Fig.12 Only adjust reactive power of line 1

(3) $P_{ref3} = 14.8$ MW, $Q_{ref3} = 0.46$ Mvar, 同时调节线路 1 的有功功率和无功功率,如图 13 所示。

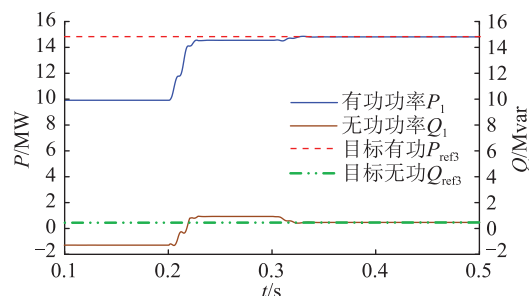


图 13 同时调节线路 1 的有功功率和无功功率

Fig.13 Simultaneously adjust the active power and reactive power of line 1

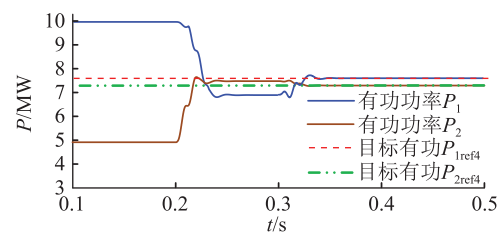


图 14 将线路 1 部分潮流转移至线路 2

Fig.14 Transfer part of power flow from line 1 to line 2

表 6 列出了线路 1 (L_1)、线路 2 (L_2) 的目标潮流 P_{ref} 、 Q_{ref} , 调节后的线路潮流 P' 、 Q' , D-MHUPFC 中 ST、UPFC 输出的电压相量 \dot{U}_{ST} 、 \dot{U}_{UPFC} 以及补偿前后线路首端电压 \dot{U}_s 、 \dot{U}'_s 。

表 6 不同潮流目标下的仿真结果

Table 6 Simulation results in different flow targets

目标	目标潮流		调节后的线路潮流	
	P_{ref}/MW	$Q_{ref}/Mvar$	P'/MW	$Q'/Mvar$
1	12.00	-1.30	12.05	-1.31
2	9.98	-0.65	10.01	-0.653
3	14.80	0.46	14.79	0.46
4(L_1)	7.58		7.59	
4(L_2)	7.31		7.30	

目标	D-MHUPFC 各部分输出电压		补偿前后线路首端电压	
	\dot{U}_{ST}/kV	\dot{U}_{UPFC}/kV	\dot{U}_s/kV	\dot{U}'_s/kV
1	$1.59 \angle 86.8^\circ$	$0.185 \angle 130.2^\circ$	$10 \angle 0^\circ$	$9.95 \angle 7.2^\circ$
2	$1.53 \angle 65.9^\circ$	$0.369 \angle -58.4^\circ$	$10 \angle 0^\circ$	$10.27 \angle 0.6^\circ$
3	$2.29 \angle 57.6^\circ$	$0.375 \angle 43.5^\circ$	$10 \angle 0^\circ$	$10.33 \angle 9.3^\circ$
4(L_1)	$1.59 \angle -35.7^\circ$	$0.365 \angle -126.3^\circ$	$10 \angle 0^\circ$	$10.08 \angle -4.2^\circ$
4(L_2)	$1.61 \angle 32.8^\circ$	$0.225 \angle 129.9^\circ$	$10 \angle 0^\circ$	$10.05 \angle 4.2^\circ$

4 个调节目标下,0.2 s 时 D-MHUPFC 投入运行,ST 部分进行一次补偿,采用 HOLTC 在约 0.25 s 完成跨档位快速投切,输出补偿电压相量 \dot{U}_{ST} ,与此同时,UPFC 协同输出 \dot{U}_{UPFC} ,在约 0.35 s 时使线路潮流达到目标值,补偿误差小于 1%。当 ST 在调节过程中输出不同电压相量时,UPFC 总在其容量范围内尽量使线路潮流接近目标值。

(4) 将线路 1 的部分有功 $\Delta P = -2.4$ MW 转移至线路 2 上,使 $P_{1ref4} = 7.58$ MW, $P_{2ref4} = 7.31$ MW, 2 条线路负载率相近,提高断面输电能力,如图 14 所示,此时仅研究有功功率变化。

将线路 1 的有功功率目标值 P_{ref5} 设置为 16 MW,分别采用 ST、UPFC 和 D-MHUPFC 进行潮流调节,仿真结果如图 15 所示。

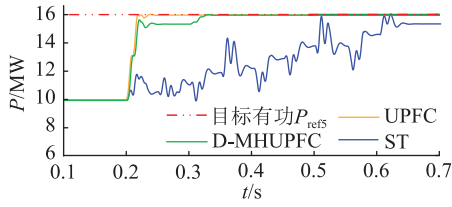


图 15 3 种潮流控制器的暂态效果

Fig.15 Transient effects of three power flow controllers

仿真结果说明 D-MHUPFC 可快速调节多线路潮流,在较低的成本条件下,实现了与 UPFC 相当的潮流调节能力,且补偿误差小于 1%。

5 结论

(1) 文中提出的 D-MHUPFC 将 ST 与 UPFC 相结合,通过 HOLTTC 实现快速跨档位切换,在调节范围、响应速度和补偿精度等方面达到与 UPFC 相当的水平,能够解耦调控多线路潮流,补偿误差小于 1%。

(2) 分析了 D-MHUPFC 中 ST 与 UPFC 的容量配合关系,合理选择 ST 开关调节级数与 UPFC 设备容量,可以在保障调节效果的前提下大幅降低制造成本和运行成本,提高运行效率。

(3) 采用 ZIP 负荷模型,研究计及 D-MHUPFC 的潮流方程,提出了 ST 的抽头投切控制策略。结合 UPFC 控制策略,D-MHUPFC 能够根据多线路潮流控制目标协同 ST 与 UPFC 的输出电压相量,在 0.15 s 内快速精准调节多线路潮流,提高系统稳定性。

参考文献:

[1] HAMADA H, KUSAYANAGI Y, TATEMATSU M, et al. Challenges for a reduced inertia power system due to the large-scale integration of renewable energy[J]. *Global Energy Interconnection*, 2022, 5(3): 266-273.

[2] 马杰,李秋燕,丁岩,等. 含高渗透率可再生能源的配电网灵活性评价指标体系及计算方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(9): 99-104, 112.

MA Jie, LI Qiuyan, DING Yan, et al. Flexibility evaluation index system and calculation method for distribution network with high-permeability renewable energy [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(9): 99-104, 112.

[3] CHEN B C, FEI W L, TIAN C H, et al. Research on an improved hybrid unified power flow controller[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(6): 5649-5660.

[4] KU T T, LIN C H, CHEN C S, et al. Coordination of transformer on-load tap changer and PV smart inverters for voltage control of

distribution feeders[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(1): 256-264.

[5] MILCZAREK A, MALINOWSKI M. Comparison of classical and smart transformers impact on MV distribution grid[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(3): 1339-1347.

[6] YANG R L, ZHANG D D, LI Z B, et al. Mechanical fault diagnostics of power transformer on-load tap changers using dynamic time warping [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(9): 3119-3127.

[7] 郝莎,徐建源,林莘. 隔离开关电弧流体数学模型研究与应用[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(13): 2710-2718.

HAO Sha, XU Jianyuan, LIN Xin. Study on the application of fluid arc model in disconnector[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(13): 2710-2718.

[8] 贾海鹏,尹靖元,李金科,等. 基于晶闸管的混合式高压直流断路器重合闸控制策略[J]. *高电压技术*, 2019, 45(1): 46-54.

JIA Haipeng, YIN Jingyuan, LI Jinke, et al. Auto-reclosing control strategy of thyristors-based high voltage DC hybrid circuit breaker[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(1): 46-54.

[9] 谢小荣,姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

XIE Xiaorong, JIANG Qirong. *Flexible AC transmission systems principles and applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[10] ADEWOLU B O, SAHA A K. FACTS devices loss consideration in placement approach for available transfer capability enhancement[J]. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2020, 49: 104-129.

[11] HAMDY M, ABDELAZIZ A Y, RAY P, et al. Comparison between flexible AC transmission systems (FACTS) and filters regarding renewable energy systems harmonics mitigation[J]. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2022, 23(2): 211-220.

[12] BEHERA T, DE D. Enhanced operation of 'Sen' transformer with improved operating point density/area for power flow control[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(14): 3158-3168.

[13] GOMIS-BELLMUNT O, SAU-BASSOLS J, PRIETO-ARAUJO E, et al. Flexible converters for meshed HVDC grids: from flexible AC transmission systems (FACTS) to flexible DC grids [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(1): 2-15.

[14] YAN M Y, SHAHIDEHPOUR M, PAASO A, et al. A convex three-stage SCOPF approach to power system flexibility with unified power flow controllers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1947-1960.

[15] PERISÉ J S, BAKKAR M, RODRÍGUEZ S B. Open-circuit fault diagnosis and maintenance in multi-pulse parallel and series TRU topologies[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(10): 10906-10916.

[16] FENG J L, HAN S, PAN Y H, et al. Steady-state modelling of Extended Sen Transformer for unified iterative power flow solu-

- tion[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 106492.
- [17] 潘宇航, 韩松, 冯金铃. 考虑多绕组耦合的 Sen Transformer 电磁解析模型[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2131-2139.
PAN Yuhang, HAN Song, FENG Jinling. Electromagnetic analytical model of Sen Transformer considering multi-winding coupling[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2131-2139.
- [18] 卡利安 K. 森, 梅琳森. 柔性交流输电系统控制器: 原理、模型与应用[M]. 程新功, 宗西举, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
KALYAN K S, MEY L S. Introduction to FACTS controllers: theory, modeling, and applications [M]. CHENG Xingong, ZONG Xiju, Trans. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [19] GASIM MOHAMED S E. Power flow control capability of the power transistor-assisted Sen transformer and the unified power flow controller; a close comparison[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(15): 3033-3041.
- [20] 陈柏超, 刘雷, 余梦泽, 等. 电磁混合式潮流控制器本体优化及控制[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1086-1094.
CHEN Baichao, LIU Lei, YU Mengze, et al. Ontology optimization and control strategy of electromagnetic hybrid power flow controller[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1086-1094.
- [21] 高飞, 刘欣, 王利桐, 等. 对称双芯移相变压器有载分接开关最大级电压计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2110-2120.
GAO Fei, LIU Xin, WANG Litong, et al. Study on the maximum step voltage calculation method of on-load tap changer in symmetrical two-core phase shifting transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2110-2120.
- [22] 李永建, 闫鑫笑, 张长庚, 等. 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4483-4491.
LI Yongjian, YAN Xinxiao, ZHANG Changgeng, et al. Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4483-4491.
- [23] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
State Grid Jiangsu Electric Power Company. Unified power flow controller technology and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [24] ELAMARI K, LOPES L A C. Implementation and experimental verification of a novel control strategy for a UPFC-based interphase power controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2079-2088.

作者简介:



袁佳俊

袁佳俊(1981),男,博士,教授,研究方向为电力系统潮流控制应用(E-mail: yjx98571@163.com);

许顺凯(1997),男,硕士,助理工程师,从事混合式统一潮流控制器在高低压电网中的应用相关工作;

余梦泽(1980),男,博士,高级工程师,从事柔性交流输电技术在电力网络中的应用相关工作。

A multi-line hybrid unified power flow controller for distribution network

YUAN Jiajun¹, XU Shunkai^{1,2}, YU Mengze³, MEI Jiajun⁴, ZHANG Weizhe¹, YANG Xinyi¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Changsha 410007, China;

3. Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

4. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to meet the power flow regulation requirements of distribution network and improve the power flow regulation ability as well as response speed, a novel multi-line hybrid unified power flow controller for distribution network (D-MHUPFC) is proposed. Based on Sen transformer, unified power flow controller (UPFC), and hybrid on-load tap changer, D-MHUPFC can quickly adjust the multi-line power flow of distribution network. Compared with the traditional regulation mode, D-MHUPFC has the advantages of compact structure, fast response, good economy, and high reliability. Then, the multi-line power flow equation considering D-MHUPFC is derived with the ZIP load model, and its cooperative control strategy is optimized. Finally, the effectiveness of proposed D-MHUPFC is proved by a 10 kV distribution network simulation platform. The results show that D-MHUPFC and its control strategy can quickly adjust the multi-line power flow within 0.15 s, and transfer the overload power as well as improve the section transmission limit. Moreover, D-MHUPFC can realize decoupling control, and the compensation errors are less than 1%. It is verified that D-MHUPFC has the same power flow regulation ability as UPFC.

Keywords: Sen transformer; unified power flow controller (UPFC); multi-line hybrid unified power flow controller for distribution network (D-MHUPFC); multiple lines; power flow regulation; fast switching

(编辑 方晶)