

DOI: 10.7667/PSPC171299

含柔性并网装置的半波长输电线路多结构并网研究

闵晓晴¹, 冯琳¹, 李国杰¹, 孙谊嫔², 于永军², 刘宗焯³

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240; 2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 先进输电技术国家重点实验室(全球能源互联网研究院), 北京 102211)

摘要: 考虑到并网偏差过大可能给半波长交流输电系统带来的隐患以及由于半波长线路的超长距离无法实现线路两端电网对并网参数的实时调节, 同时考虑了未来半波长系统并网结构的多样性, 设计了三种典型半波长输电线路的并网结构, 将柔性并网装置应用于多结构的半波长线路并网调节中。然后分析接入 UPFC 的半波长输电系统等效电路, 研究了该柔性并网装置的适用性。并通过 Matlab/Simulink 软件进行仿真, 结果表明采用的柔性并网装置适用于多种并网结构的半波长输电线路, 能够大幅改善并网特性。该结果可为未来半波长输电工程的多结构并网控制提供相应的支撑。

关键词: 半波长; 输电线路; 柔性并网; 柔性装置; 多结构

Study on multi-structure grid-connection of half-wavelength transmission line with flexible grid-connection device

MIN Xiaoping¹, FENG Lin¹, LI Guojie¹, SUN Yiqian², YU Yongjun², LIU Zongyue³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission and Power Conversion Control (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830011, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute), Beijing 102211, China)

Abstract: Considering the hidden danger caused by large grid-connection deviation for half-wavelength AC transmission systems, difficulty to simultaneous adjustment of grid-connection parameters at both ends of half-wavelength line due to its long distance, and future variety of grid-connection structures for half-wavelength systems, this paper designs three typical kinds of grid-connection structures of half-wavelength transmission line and uses the flexible device for grid-connection adjustment. Then, the equivalent circuit of half-wavelength transmission system connected with UPFC is analyzed, and also the applicability of the flexible grid-connection device is studied. By simulating in Matlab/Simulink platform, the results show that the flexible grid-connection device is suitable for multi-structure half-wavelength transmission lines, and it can generally improve the grid-connection characteristics. The results can provide support for multi-structure grid-connection control of half-wavelength transmission projects in the future.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477098) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGXJDK00DJJS1600151).

Key words: half-wavelength; transmission line; flexible grid-connection; flexible device; multi-structure

0 引言

半波长交流输电(Half-wavelength AC Transmission, HWACT)是指输电的电气距离接近 1 个工频半波, 即 3 000 km(50 Hz)或 2 500 km(60 Hz)的超远距离的

三相交流输电^[1]。与普通线路相比, 半波长线路两端电压始终保持大小相等、相位相反, 无需安装无功补偿设备, 同时半波长线路的输送能力更强, 可以达到 1.0~1.2 倍的自然功率。因此, 近年来半波长输电受到广泛关注, 成为未来超远距离、超大容量电力输电的前瞻性方案之一^[2-3]。现已有学者对半波长输电线路的稳态特性^[4-5]、暂态特性^[6]、过电压问题^[7-8]、潜供电流抑制^[8]、经济性分析^[9-10]和故

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477098); 国家电网科技项目资助(SGXJDK00DJJS1600151)

障与保护^[11]等方面做了比较详细的理论研究,但暂无研究涉及半波长线路并网方面。半波长线路并网过程中,若并网点两侧的电压、频率及相角等参数存在较大差异,可能引起沿线过电压、过电流等相关问题,还存在破坏半波长输电特性的可能性。可以采用在半波长线路的并网点处设置柔性并网装置,实现对并网参数的调节。

目前已有部分研究将柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)设备应用于新能源并网运行^[12-13],但应用于普通输电系统并网的研究较少。文献[14-15]提出了一种基于功率传递的电网间同期并列的方法,通过迅速独立地调整待并列两侧系统有功和无功功率,达到调整两侧系统频率差和电压差的目的,并将该方法与静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)技术相结合,形成一种可以实现电网间同期并列,又能在并列成功后对电网进行无功补偿的复合系统。考虑到半波长输电线路输送功率通常很大,若将上述基于 STATCOM 功率传递的并网方法应用在半波长输电线路中,对柔性并网装置的容量需求较大,成本较高,并且控制比较复杂,难以实现。而统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)可以对系统的有功、无功、电压、阻抗和功角等分别进行快速动态控制,能有效地调节基波电压的大小和相位,相对于其他柔性装置有很大的优越性。本文将 UPFC 装置应用于多种并网结构的半波长线路的并网研究,对其补偿效果以及补偿后是否影响线路本身输电特性进行了仿真研究。

1 半波长线路同期并网分析

为保证电力系统的稳定可靠运行,机组与电网之间的并列或者电网与电网之间的并列需要满足同期并网的原则^[16]。理想条件为并网点两侧电压的电压幅值、频率和相位角三个状态量一致。如图 1(a)所示,两系统通过断路器 QF 进行并列。要满足同期并网的原则,理想情况下是图 1(b)中的并网点两侧电压 U_{S1} 、 U_{S2} 向量完全重合并且保持同步旋转,即两侧电压状态量的差值 U_{Δ} 为零。

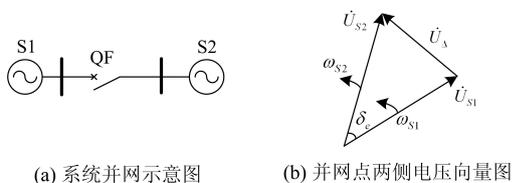


图 1 系统同期并网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system synchronized grid-connection

同期并网原则对半波长线路同样适用。但半波长线路距离较长,需要考虑线路的分布参数^[17],线路沿线各点电压电流数值不一,变化较大,需要快速、准确地对并网点参数进行调节控制。另外半波长线路的优势在于其两端电压始终保持幅值相等,相位相差 180° 。并网过慢,误差过大也很可能影响半波长本身的传输特性,引起过电压、过电流等问题。

半波长线路的距离长达近 3 000 km,对实现并网点同期并网也带来了一定困难,其信号测量、延时、精度都会影响同期并网,难以同时满足两个电网的频率、幅值、相位相同的条件,所以仅通过半波长线路两端电网的调节来实现高精度快速并网难度较大。传统的并网方式主要是通过调整发电机的转速和励磁来调整频率差和电压差,只适用于发电厂与系统的并网,不适用于半波长线路网对网并网,同时机电的速度和准确度也不及柔性装置。所以采用在半波长线路的并网点处设置柔性并网装置,可以较好地解决这一问题。

相比较而言,普通线路电压电流无需考虑沿线分布,变化不大,对并网精度和速度的要求不高,通常不需要满足上述理想条件,满足式(1)即可^[12]。

$$\text{实际条件} \begin{cases} |\Delta f| \leq (0.2\% \sim 0.5\%) f_N \\ |\Delta U| \leq (5\% \sim 10\%) U_N \\ |\delta| \leq 10^\circ \end{cases} \quad (1)$$

在普通线路中,一般通过线路两端电网或发电机对并网点参数进行调节即可实现线路的准同期并网。所以,柔性并网装置在半波长线路并网当中的应用更为必要。

柔性并网装置的作用是将并网点两侧的状态量控制在一定范围内。并网参数越趋于一致时,并网特性越好。但柔性并网装置在半波长线路当中的效果和适用性,需要通过仿真和分析判断。

2 统一潮流控制器应用于半波长线路多结构并网的方案和原理

2.1 半波长线路多结构柔性并网方案

本文构建了基于半波长线路的三种不同并网结构,分别为半波长首端并网结构、半波长线路首端网对网并网结构和半波长环网并网结构,在这三种结构的并网点处加设基于 UPFC 的柔性装置,控制其实现同期并网,其中半波长线路首端柔性并网结构如图 2 所示,并网点位于半波长输电线路送端,受端交流系统已与半波长线路连接的情况下,通过并网断路器 QF1 与送端交流系统相连,柔性装置处

于 QF1 与送端交流系统之间。

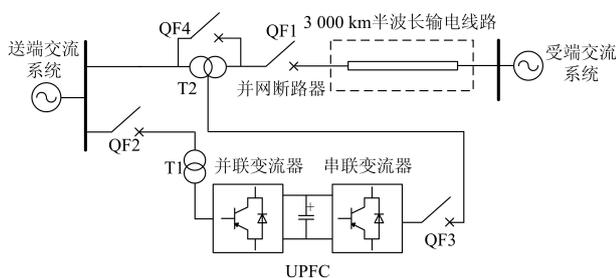


图 2 半波长线路首端柔性并网结构图

Fig. 2 Structure diagram of flexible grid-connection at head of half-wavelength line

需要并网前, 并网断路器 QF1 处于断开状态, 分别将断路器 QF2、QF3 合闸, QF4 断开, 通过调节柔性并网装置, 控制 QF1 两侧并网参数一致, 合上断路器 QF1, 完成并网操作。

图 3 为半波长线路首端网对网柔性并网结构, 即在半波长输电系统正常运行情况下, 首端再并入一相容量系统。图 4 为半波长线路环网柔性并网结构, 即半波长输电线路两端电网已通过其他输电线路存在电气连接, 此时再通过半波长输电线路进行连接。并网时的操作步骤与图 2 所示结构相同。

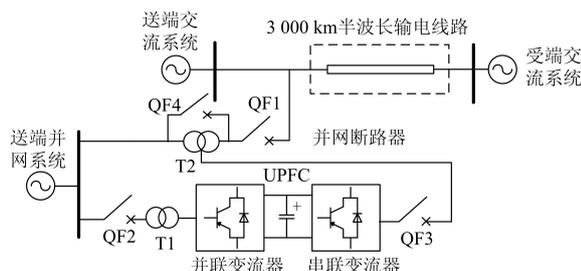


图 3 半波长线路首端网对网柔性并网结构图

Fig. 3 Structure diagram of flexible grid-to-grid connection at head of half-wavelength line

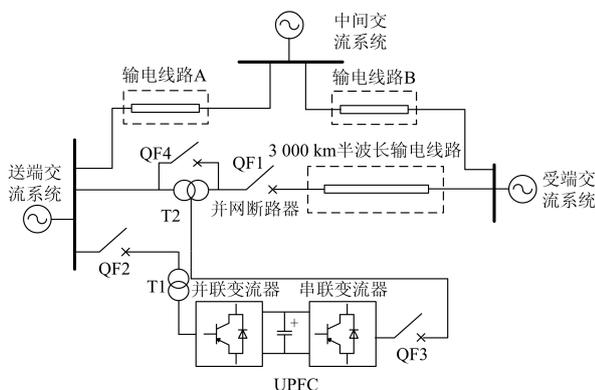


图 4 半波长线路环网柔性并网结构图

Fig. 4 Structure diagram of flexible grid-connection on half-wavelength line in looped state

在装置完成并网后, 改变相应的控制策略, 可以实现统一潮流控制器的其他功能, 如对负载端电压、负载无功功率, 线路有功功率和无功功率进行综合调控, 实现输电系统的潮流优化, 还可以提高线路暂稳极限, 抑制低频振荡^[18], 实现多目标协调控制^[19]。半波长线路柔性并网的整个控制流程可由图 5 表示。

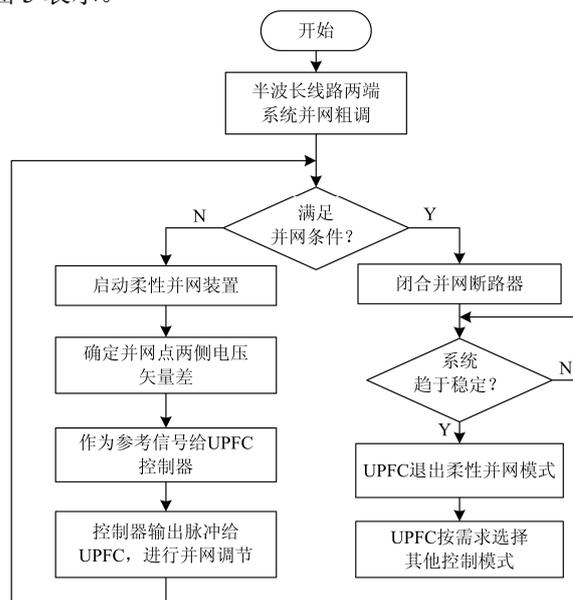


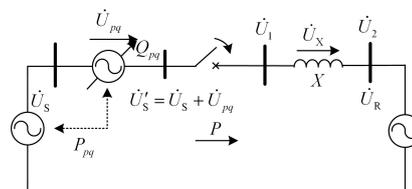
图 5 半波长线路柔性并网控制策略流程图

Fig. 5 Control strategy flow chart of half-wavelength lines flexible grid-connection

2.2 半波长线路多结构柔性并网原理

基于 UPFC 的柔性并网控制是对串联在线路中的注入电压矢量 \dot{U}_{pq} 的幅值和相位角进行控制, 所以并网模式下主要是对 UPFC 中串联变流器的控制, 串联变流器处于手动电压注入模式, 参考电压通过外部设定, 即并网点两侧电压状态量的差值。通过 UPFC 控制器将参考电压转换为脉冲信号, 传输给串联变流器。

下面对 UPFC 应用于并网补偿的原理作具体分析。UPFC 可以看作一个广义的同步电压源 (SVS)^[20], 串联注入电压矢量 \dot{U}_{pq} 的幅值 U_{pq} ($0 \leq U_{pq} \leq U_{pq \max}$) 和相位角 ($0 \leq \rho \leq 2\pi$) 都是可控的。图 6(a)为首端直接接入 UPFC 装置的输电系统等效电路图。



(a) 等效电路

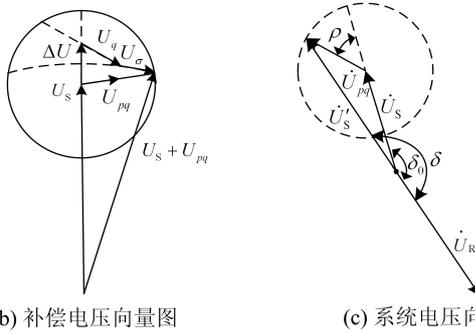


图 6 接入 UPFC 的半波长输电系统等效电路及其相量图

Fig. 6 Equivalent circuit and phase diagram of a half-wavelength transmission system contained UPFC

两侧系统电压分别为 \dot{U}_S 和 \dot{U}_R ，线路阻抗为 X 。UPFC 串联注入电压矢量 \dot{U}_{pq} ，它可在以 \dot{U}_S 为圆心、 $U_{pq \max}$ 为半径的圆盘内任意设置。

注入电压矢量 \dot{U}_{pq} 可分解为如式(2)所示。

$$\dot{U}_{pq} = \Delta\dot{U} + \dot{U}_q + \dot{U}_\sigma \quad (2)$$

式中： $\Delta\dot{U}$ 主要起电压幅值调节作用； \dot{U}_σ 主要起相位角调节作用； \dot{U}_q 为串联无功补偿电压，在并网调节中不直接起作用。矢量关系如图 6(b)所示。

由式(2)，UPFC 可实现对并网点两侧电压幅值差和相位差的灵活调节，但并网点两侧存在频率差时，UPFC 不能直接起到调节作用，此时可以通知发电侧调节发电机转速实现频率调节，半波长线路柔性并网研究不考虑频率调节这一环节。

UPFC 装置输出侧的电压 $\dot{U}'_s = \dot{U}_s + \dot{U}_{pq}$ ，并网调节则是要控制 \dot{U}'_s 与并网断路器右侧电压 \dot{U}_1 相等。根据沿长线的电压和电流分布特性^[17]，半波长线路首端电压 \dot{U}_1 可用末端功率和末端电压幅值 U_2 表示，如式(3)所示。

$$\dot{U}_1 = U_2 (\cos \alpha l + Q_{2*} \sin \alpha l + jP_{2*} \sin \alpha l) \quad (3)$$

式中： P_{2*} 、 Q_{2*} 为线路末端的有功功率和无功功率标幺值； α 为相位系数； l 为线路长度。3 000 m 半波长线路的 αl 值约为 180° ，而并网前 $P_{2*}=0$ ， $Q_{2*}=0$ 。由式(2)，线路两端电压仍保持幅值相等、相位相反，即 $\dot{U}_1 = -\dot{U}_2 = -\dot{U}_R$ ，因此需要利用 UPFC 将 \dot{U}'_s 调节与 $-\dot{U}_R$ 一致，如图 6(c)。

UPFC 用于半波长线路首端直接并网的原理如上，对于其他并网结构，如半波长线路首端网对网并网结构，半波长线路环网并列的结构，其原理是相同的。

3 多结构半波长线路柔性并网仿真研究

本文在 Matlab/Simulink 环境下搭建含柔性装置的三种并网结构的半波长输电系统，进行柔性并网特性仿真。

3.1 半波长线路首端柔性并网

半波长线路首端柔性并网的系统结构如图 7 所示。

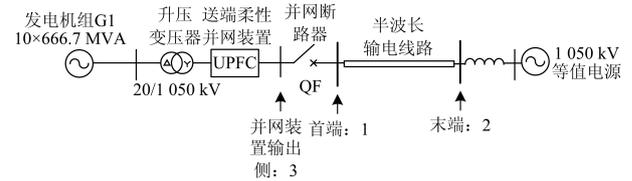


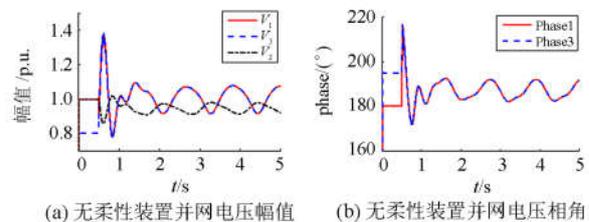
图 7 半波长线路首端柔性并网示意图

Fig. 7 Schematic diagram of flexible grid-connection at head of half-wavelength line

送端为 10×666.7 MVA 发电机组 G1，输送功率约为 1.2 倍自然功率 6 000 MW，机端电压 20 kV，经特高压升压变压器升至 1 050 kV 送出，变压器右端接 UPFC 柔性装置，柔性装置右端为并网断路器 QF，QF 右侧经半波长传输线路与受端等值电源相连，受端等值电源为 1 050 kV，正序电阻为 0.814Ω ，正序电抗为 10.392Ω ，相位为 0° 。线路采用 1 000 kV 特高压线路的典型参数为 $r_0=0.0078 \Omega/\text{km}$ ， $L_0=0.83365 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_0=0.0138 \mu\text{F}/\text{km}$ 。线路模型采用两段级联的分布参数等值 II 型模型^[5]，相对于其他近似参数等值模型，该模型能够精确严格地等值半波长线路的参数特性。设输电线路首端即并网点右侧为节点 1，输电线路末端为节点 2，柔性装置输出侧即并网点左侧为节点 3。

在下面的仿真分析中，比较了并网点两侧同时存在压差和相位差并网($\Delta V=20\%V_N$, $\Delta\theta=15^\circ$)时，有无柔性并网装置对半波长输电线路并网特性的影响。

图 8(a)和图 8(b)为无柔性装置直接并网的节点 1、2、3 的电压幅值和节点 1、3 的电压相角，图 8(c)和图 8(d)为加入柔性并网装置的电压幅值和相角。



(a) 无柔性装置并网电压幅值

(b) 无柔性装置并网电压相角

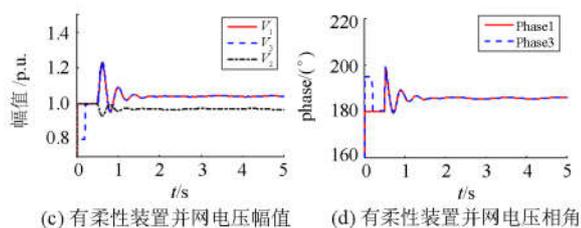


图 8 半波长线路首端并网电压幅值和相角

Fig. 8 Voltage amplitude and phase angle of half-wavelength line when grid-connected at head of line

由图 8(a)和图 8(b), V_1 初始状态与 V_2 重合, 在同时存在 20%电压差和 15° 相角差的情况下在 0.5 s 直接并网, V_3 与 V_1 因并网断路器合闸, 所以并网后波形重合, 经过约 1 s 的暂态, 达到稳态时线路电压幅值和相角的振荡波形已产生畸变, 需通过柔性装置进行并网补偿。由图 8(c)和图 8(d), 采用柔性装置, 在 0.2 s 将电压和相角补偿至一致后, 在 0.5 s 并网。结果表明, 线路电压和相角的并网特性大大改善, 暂态振荡幅度减小, 稳态低频振荡幅度可忽略不计, 稳态时, 首端电压因线路阻抗被拉高到约 1.05 p.u., 符合半波长线路的沿线电压特性。

图 9(a)为有无柔性装置并网情况下的线路首端电流幅值, 图 9(b)为有无柔性装置情况下的首末端相角差值。

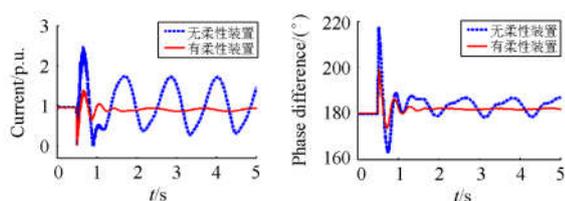


图 9 半波长线路首端并网电流和首末端相角差

Fig. 9 Head current and phase difference between head and end of half-wavelength line when grid-connected at head of line

由图 9(a), 无柔性并网装置并网时的线路电流峰值达到了 2.487 p.u., 而工作温度 70°C 下导线最大过电流倍数为 2.386, 已超限值, 而且稳态时的振荡幅度很大, 并随时间逐渐增大, 无法保持稳定, 而由图 9(b), 相角差的暂态振荡幅度很大, 稳态波动也发生了畸变, 所以也需要加入柔性并网装置进行并网调节。调节后, 电流和首末端相角差的暂态振荡减小, 稳态低频振荡也得到抑制, 首末端相角差能够稳定在 180° 左右, 保持半波长原输电特性。进一步分析上述仿真结果, 将结果量化列于表 1 中。

表 1 首端并网半波长线路并网特性

Table 1 Grid-connection characteristics of half-wavelength line when grid-connected at head of line

	首端电 压振幅/ p.u.	末端电 压振幅/ p.u.	相角差 振幅/ ($^\circ$)	电流 振幅/ p.u.	电流低 频振幅/ p.u.
无柔性装置	0.608	0.161 9	54.4	2.483	1.432 8
有柔性装置	0.280 6	0.069 6	25.9	1.360 3	0.080 1

由表 1, 加入柔性并网装置后, 各项并网参数都有不同程度的改善, 前四项暂态幅度减小 45.22%~57.01%, 而稳态电流的低频振荡幅度减小了 94.41%。加入柔性并网后, 并网的暂态振荡仍然存在, 但幅度减小, 这是输电线路中从断电到输电的过程中自然存在的暂态振荡。

3.2 半波长线路首端网对网柔性并网

半波长输电线路正常运行后, 首端并入一容量相似的发电系统。其柔性并网结构如图 10 所示。

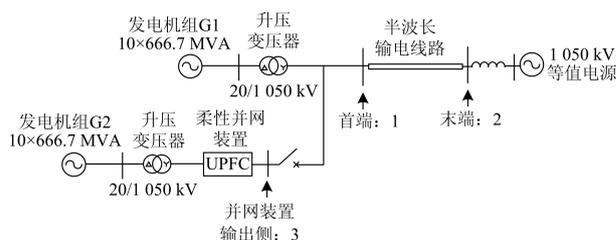


图 10 半波长线路首端网对网柔性并网示意图

Fig. 10 Schematic diagram of flexible grid-to-grid connection at head of half-wavelength line

半波长线路参数和模型与 3.1 节的结构一致, 并入发电机组 G2 的参数与 G1 一致, G2 机端电压 20 kV, 经特高压升压变压器升至 1 050 kV 送出, 变压器右接 UPFC 柔性装置, 经并网断路器 QF 与半波长线路首端相连。输电线路首端, 并网点右侧为节点 1, 输电线路末端为节点 2, 柔性装置输出侧, 并网点左侧为节点 3。仿真比较了并网点两侧同时存在压差和相位差并网 ($\Delta V=20\%V_N$, $\Delta\theta=15^\circ$) 时, 有无柔性并网装置对半波长输电线路并网特性的影响。

图 11(a)和图 11(b)为无柔性并网装置首端网对网并网的节点 1、2、3 的电压幅值和节点 1、3 的电压相角, 图 11(c)和图 11(d)为加入柔性并网装置的电压幅值和相角。

由图 11(a)和图 11(b), 初始状态时, 线路首端电压 V_1 幅值约为 1.05 p.u., 末端电压 V_2 幅值为 1 p.u., 并网前, V_3 和 V_1 存在 20%电压差, 15° 相角差, 0.5 s 直接并网。并网后, V_3 和 V_1 幅值波形因断路器合闸而重合, 虽然暂态振荡幅度在可接受范围内, 但稳

态时的低频振荡较大，并且存在逐渐变大的趋势，无法保持稳定。加入柔性装置调节一致后并网，由图11(c)和图11(d)可见，暂态振荡几乎消失，稳态振幅也很小，可忽略不计。

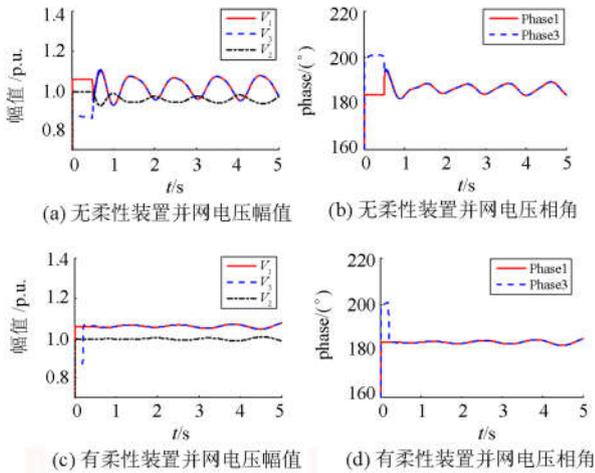


图 11 半波长线路首端网对网并网电压幅值和相角

Fig. 11 Voltage amplitude and phase angle of half-wavelength line when connected grid-to-grid at head of line

图 12(a)为有无柔性装置情况下的线路首端电流幅值，图 12(b)为有无柔性装置情况下的首末端相角差值。

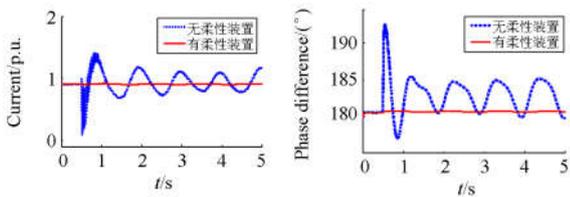


图 12 半波长线路首端网对网并网电流和首末端相角差

Fig. 12 Head current and phase difference between head and end of half-wavelength line when connected grid-to-grid at head of line

由图 12(a)和图 12(b)，加入柔性装置后并网的冲击电流抑制效果显著，首末端相角差的暂态振荡和低频振荡也得到了大幅的改善，并且不影响半波长原输电特性。进一步分析上述仿真结果，将结果量化列于表 2 中。

表 2 首端网对网并网半波长线路并网特性

Table 2 Grid connection characteristics of half-wavelength line when connected grid-to-grid at head of line

	首端电压 振幅/p.u.	末端电压 振幅/p.u.	相角差振 幅/(°)	电流 振幅/p.u.	电流低频 振幅/p.u.
无柔性装置	0.176 5	0.061 7	15.4	1.347 3	0.479 8
有柔性装置	0.005	0.001	2.8	0.017	0.017 5

由表 2，加入柔性并网装置后，前四项暂态振荡幅度减小 82.82%~98.74%，而稳态电流的低频振荡幅度减小了 96.35%，各项冲击参数都近乎减小至 0，并网特性得到大幅提升。

3.3 半波长线路环网柔性并网

半波长输电线路两端电网已通过其他输电线路存在电气连接，此时再通过半波长输电线路进行连接。其柔性并网结构图如图 13 所示。

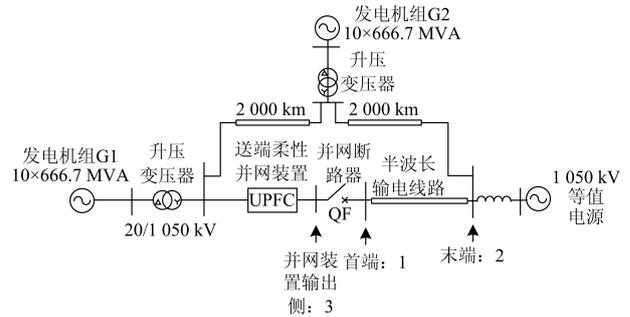


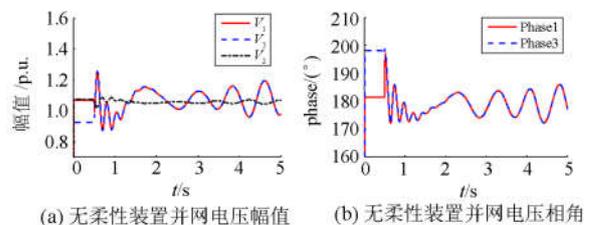
图 13 半波长线路环网柔性并网示意图

Fig. 13 Schematic diagram of flexible grid-connection on half-wavelength line in looped state

并网前，首端发电系统 G1 经 2 000 km 输电线路与中段电源发电机组 G2 连接，G2 再通过 2 000 km 输电线路与末端等值电源相连，线路参数同为 1 000 kV 特高压线路的典型参数，模型都采用两段级联的分布参数等值 II 型模型，G2 参数与 G1 一致。所以在半波长线路并网前，首末端电源已经存在电气连接，此时半波长线路首末端频率相等，但电压幅值和相位存在一定的偏差。在线路首端加入 UPFC 柔性并网装置，经并网断路器 QF 与半波长线路连接。半波长输电线路首端即并网点右侧为节点 1，输电线路末端为节点 2，柔性装置输出侧即并网点左侧为节点 3。

图 14(a)和图 14(b)为无柔性并网装置半波长线路环网并网的节点 1、2、3 的电压幅值和节点 1、3 的电压相角，图 14(c)和图 14(d)为加入柔性并网装置的电压幅值和相角。

由图 14(a)和图 14(b)，初始状态时， V_3 和 V_1 存在约 15%电压差， 20° 相角差，在 0.5 s 直接并网。并网后， V_3 和 V_1 幅值波形因断路器合闸而重合，虽然



(a) 无柔性装置并网电压幅值

(b) 无柔性装置并网电压相角

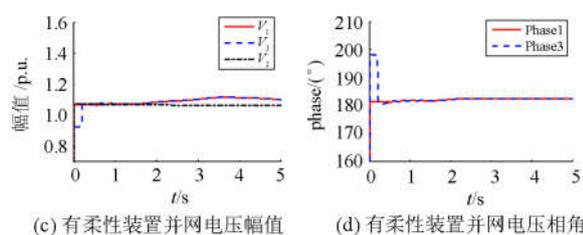


图 14 半波长线路环网并网电压幅值和相角

Fig. 14 Voltage amplitude and phase angle of half-wavelength line when grid-connected in looped state

暂态振荡幅度在可接受范围内, 但稳态时电压和相角波动幅度随时间逐渐变大, 无法保持稳定。加入柔性装置调节一致后并网, 由图14(c)和图14(d)可见, 暂态振荡几乎消失, 并且首末端电压逐渐变为半波长线路首末端电压稳态值。

图 15(a)为有无柔性装置情况下的线路首端电流幅值, 图 15(b)为有无柔性装置情况下的首末端相角差值。

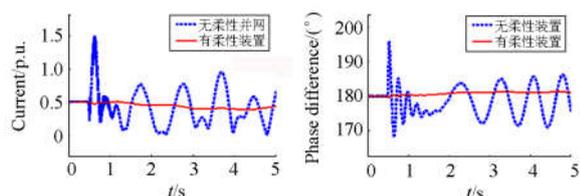


图 15 半波长线路环网并网电流和首末端相角差

Fig. 15 Head current and phase difference between head and end of half-wavelength line when grid-connected in looped state

由图 15(a)和图 15(b), 加入柔性装置前, 并网电流和首末端相角的暂态振荡和稳态波动幅度都较大, 加入柔性装置后, 两者的暂态振荡近乎为零, 抑制效果显著。进一步分析上述仿真结果, 将结果量化列于表 3 中。

表 3 环网并网半波长线路并网特性

Table 3 Grid connection characteristics of half-wavelength line when grid-connected in looped state

	首端电压 振幅/p.u.	末端电压 振幅/p.u.	相角差 振幅/(°)	电流 振幅/p.u.	电流低频 振幅/p.u.
无柔性装置	0.387 1	0.063	27.8	1.263 3	0.387 1
有柔性装置	0.007	0.002	0.9	0.017	0.007

由表 3, 加入柔性并网装置后, 各项并网参数都有大幅减小, 前四项暂态振荡幅度减小 96.76%~98.65%, 而稳态电流的低频振荡幅度减小了 98.19%, 各项冲击参数都近乎减小至 0, 并网特

性得到较大提升。

4 结论

本文基于同期并网理论和统一潮流控制器 (UPFC) 的工作原理, 将 UPFC 作为柔性并网装置, 应用于半波长线路的并网操作, 同时考虑到未来半波长线路并网结构的多样性, 本文设计了三种可能的含柔性并网装置的半波长线路并网结构, 分别为半波长线路首端直接柔性并网、半波长线路首端网对网柔性并网和半波长线路环网柔性并网结构。通过在 Matlab/Simulink 中建立多种结构的半波长输电线路柔性并网仿真系统, 研究了该柔性并网装置的适用性。仿真结果表明, 基于 UPFC 的柔性并网装置适用于多种并网结构的半波长线路, 不会影响不同结构半波长线路的原输电特性, 同时能够大幅改善各线路结构的并网特性。本文对半波长线路多结构柔性并网的仿真与分析, 为未来半波长输电工程的多结构并网控制提供了相应支撑依据。

参考文献

- [1] WOLF A A, SHCHERBACHEV O V. On normal working conditions of compensated lines with half-wave characteristics[J]. *Elektrichestvo*, 1940(1): 147-158.
- [2] 梁旭明. 半波长交流输电技术研究及应用展望[J]. *智能电网*, 2015, 3(12): 1091-1096.
LIANG Xuming. Technology research and application prospect of half-wavelength alternating current transmission[J]. *Smart Grid*, 2015, 3(12): 1091-1096.
- [3] GOMES L C F, SILVA L C P D, TAVARES M C. Half-wavelength transmission lines for connecting power plants in Amazon region to the Brazilian system[C] // *Proceedings of Power Technology*, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-6.
- [4] 王玲桃, 崔翔. 特高压半波长交流输电线路稳态特性研究[J]. *电网技术*, 2011, 35(9): 7-12.
WANG Lingtao, CUI Xiang. Research on steady-state operation characteristics of UHV half-wavelength AC power transmission line[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(9): 7-12.
- [5] 秦晓辉, 张志强, 徐征雄, 等. 基于准稳态模型的特高压半波长交流输电系统稳态特性与暂态稳定研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(31): 66-76.
QIN Xiaohui, ZHANG Zhiqiang, XU Zhengxiong, et al. Study on the steady state characteristic and transient stability of UHV AC halfwave-length transmission system based on quasi-steady model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(31): 66-76.

- [6] 张志强, 秦晓辉, 徐征雄, 等. 特高压半波长交流输电技术在我国新疆地区电源送出规划中的暂态稳定性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 42-45.
ZHANG Zhiqiang, QIN Xiaohui, XU Zhengxiong, et al. Research on transient stability of UHV half-wavelength AC transmission in the plan of sending out electric power from Xinjiang region[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 42-45.
- [7] WANG L T, CUI X. A method for suppressing steady-state operating overvoltages of the half wave-length UHV AC power transmission line[C] // Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1-4, 2011, Chengdu, China: 551-554.
- [8] 王冠. 特高压半波长输电技术的若干关键问题研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
WANG Guan. Explorative research on some key issues of the UHV half-wave transmission technology[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [9] SANTOS M L D, JARDINI J A, CASOLARI R P, et al. Power transmission over long distances: economic comparison between HVDC and half-wavelength line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 502-509.
- [10] 宋云亭, 周霄, 李碧辉, 等. 特高压半波长交流输电系统经济性与可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 1-6.
SONG Yunting, ZHOU Xiao, LI Bihui, et al. Economic analysis and reliability assessment of UHV half-wavelength AC transmission[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 1-6.
- [11] WANG Qingping, BO Zhiqian, MA Xiaowei, et al. Integrated protection based on multifrequency domain information for UHV half-wavelength AC transmission line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 157-163. DOI: 10.1186/s41601-016-0027-8.
- [12] 易成星, 周前, 杨伟. 统一潮流控制器在风电机组并网运行中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 46-51.
YI Chengxing, ZHOU Qian, YANG Wei. Implementation of UPFC on wind farm interconnected to power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 46-51.
- [13] 郑丽平, 匡洪海, 张曙云, 等. TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的改善[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 90-95.
ZHENG Liping, KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, et al. Voltage stability improvement of wind power integrated system using TCSC-STATCOM control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 90-95.
- [14] 刘家军, 吴添森, 崔志国, 等. 一种基于 STATCOM 的电网间同期并列复合系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 87-91.
LIU Jiajun, WU Tiansen, CUI Zhiguo, et al. A compound system of power grid synchronization based on STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 87-91.
- [15] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 基于功率传递并网方式的联络线功率波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 125-128.
LIU Jiajun, YAN Bo, YAO Lixiao, et al. Research on tie-line power fluctuation based on power transmission parallel[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 125-128.
- [16] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [17] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下册)[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [18] 李林, 宋宗勋, 李峰, 等. 抑制区域间低频振荡的 UPFC 模糊滑模控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 104-109.
LI Lin, SONG Zongxun, LI Feng, et al. UPFC fuzzy sliding mode controller for damping inter-area low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 104-109.
- [19] 王韶, 刘光时, 邹青林. 计及 UPFC 的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 95-100.
WANG Shao, LIU Guangshi, ZOU Qinglin. Multi-objective reactive power optimization incorporating UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 95-100.
- [20] 程汉湘, 聂一雄. 柔性交流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2013.

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2018-03-26

作者简介:

闵晓晴(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为半波长输电, 交直流配电网; E-mail: minxiaoping1993@sjtu.edu.cn

冯琳(1976—), 女, 讲师, 研究方向为新能源并网, 交直流配电网; E-mail: fenglin@sjtu.edu.cn

李国杰(1965—), 男, 教授, 研究方向为新能源, 电力系统等. E-mail: liguojie@sjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)