

复合型FCL改善风火打捆系统暂态稳定性研究

石 帅

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 为改善风火打捆系统的暂态稳定性, 提出将具有串补功能的复合型故障限流器 (Fault Current Limiter, FCL) 接入到风火打捆系统中。将双馈风电机组 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 对系统的影响用等效外特性参数表示, 在分析 DFIG 接入系统对暂态稳定的影响和复合型 FCL 工作原理的基础上, 分析带复合型 FCL 的风火打捆系统的功率特性方程, 通过分析在不同运行状态下复合型 FCL 对功率特性方程中输入阻抗、转移阻抗的影响, 确定其对传输功率极限的作用, 分析其提高暂态稳定性的机理。制定了故障发生前、中、后不同阶段, 复合型 FCL 提高风火打捆系统暂态稳定性的控制策略。正常运行及故障切除后发挥复合型 FCL 的串补功能; 故障状态下通过确定目标功率差与触发角之间的关系, 通过控制限流电抗, 发挥 FCL 限制短路电流、提高母线电压的作用, 达到提高功率输送能力, 改善暂态稳定性的目的。仿真分析表明机理分析和所提控制策略的有效性。

关键词: 风火打捆系统; 风电等值; 复合型 FCL; 暂态稳定性

Study on improving transient stability of wind-thermal baling system with compound FCL

SHI Shuai

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to improve the transient stability of the wind fire baling system, a fault current limiter (FCL) with series compensation function is introduced into the wind fire baling system. The influence of doubly fed wind turbine DFIG(doubly fed induction generator) on the system is expressed by equivalent external characteristic parameters. Based on the analysis of the influence of DFIG on the transient stability and the working principle of compound FCL, the power characteristic equation of the wind-thermal baling system with compound FCL is analyzed. By analyzing the influence of compound FCL on the input impedance and transfer impedance in the power characteristic equation under different operating conditions, the effect of FCL on the transmission power limit is determined, and the mechanism of improving the transient stability is analyzed. The control strategy of compound FCL to improve the transient stability of the air-fire baling system is developed at different stages before, during and after the fault occurs. After normal operation and fault removal, the series complement function of compound FCL can be played. By determining the relationship between the target power difference and the trigger Angle, and controlling the current limiting reactance, FCL can limit the short circuit current and improve the bus voltage, so as to improve the power transmission capacity and transient stability. Simulation analysis shows the effectiveness of mechanism analysis and proposed control strategy.

Key words: wind-thermal binding system; equivalence of wind power; Compound FCL; transient stability

0 引言

随着能源消耗和环境问题越来越显著，走可持续发展路线，更好地开发和利用可再生能源已成为我国当前发展的目标之一。而风力发电由于其清洁、无污染等优点已成为当前新能源发展的主要方向。我国风电资源、煤炭资源与电力负荷中心呈现“反向分布”，风电及煤炭资源主要分布在“三北”地区，而这些地区受经济条件制约导致其用电负荷水平较低，风电消耗能力有限，所以需要将丰富的风电功率输送到电力需求更大的东部沿海地区^[1]，而“风火打捆”外送模式就成为了风电功率远距离输送的高效途径。

风火打捆输送模式有利于风电消纳，使得经济效益得到改善的同时，也会给系统的暂态稳定带来一系列挑战。虽然风火打捆系统中的风电机组DFIG本身不存在暂态功角稳定问题，但是已有研究表明在系统发生故障时，需要考虑风电接入对火电机组功角稳定的影响^[2-3]。文献[2]指出当DFIG替代火电机组接入电网时，将引起火电机组输出暂态有功功率发生改变，并造成系统惯量缺额。文献[3]定义了风电机组的功角，认为在发生扰动时，功角曲线的“主动交越”会使同步机组功角摆幅增大，削弱系统的暂态稳定性。文献[4]提出风电机组接入系统达到一定比例后，会造成系统功角稳定性出现恶化的趋势。文献[5]研究了DFIG与系统中火电机组的相互影响，得出DFIG接入系统对系统稳定性不利的结论。文献[6]通过构造含DFIG的电力系统暂态能量函数，在不同条件下进行仿真分析，得出DFIG接入对比于火电机组接入，系统暂态稳定性被削弱的结论。尤其对于风火打捆系统，由于外送容量大，联络线潮流重，若遭受短路故障等大扰动冲击，风火打捆系统中的火电机组失去暂态稳定的风险更大^[7]。

保证风火打捆系统的安全稳定运行，根据暂态稳定分析原理可知：关键要减小故障期间引起转子加速的功率差额，降低加速能力以及提高故障后输送通道的功率输送能力^[7]。近年来故障限流器（Fault Current Limiter, FCL）

作为柔性交流输电系统（Flexible Alternative Current Transmission System, FACTS）家族中的一员，为此提供了一定的技术支持^[8]，已有文献研究利用其提高系统暂态稳定性。文献[9]通过分析含永磁偏置型故障限流器（Permanent-Magnet-biased saturation based Fault Current Limiter, PMFCL）的电力系统暂态稳定模型，详细阐述了在系统不同位置受到不同类型的扰动时PMFCL对系统暂态稳定性的影响。文献[10]通过建模仿真和实验的方法，基于发电机功角曲线和等面积准则分析了电阻型超导故障限流器（Superconducting Fault Current Limiter, SFCL）对系统暂态稳定性的影响，并给出了一种确定SFCL最优电阻值的方法。目前利用故障限流器提高系统暂态稳定主要集中在不含风电的电力系统中，只有少部分文献将其引入风火打捆系统中。现有的文献[11]中分析了电阻型和电抗型故障限流器对改善风火打捆系统暂态稳定性的作用，但该文献只是分析了普通型故障限流器只能在故障期间发挥作用，并且限流阻抗也不能根据需求灵活调整控制。文献[7]阐述引起风火打捆系统发生失稳的因素除了故障期间的加速能量外，另一个主要因素是故障后，外送通道被削弱，外送系统输电能力下降。而具有串联补偿作用的复合型FCL既可以在故障状态下根据需要调控限流电抗，限制短路电流，又可以在故障切除后进行串联补偿，提高系统传输能力。

本文参考文献[12]中建立的风电场等效模型，将具有串联补偿功能的复合型FCL接入到含DFIG的风火打捆系统输电线路中，建立含复合型FCL的DFIG型风火打捆系统暂态稳定数学模型，分析复合型FCL在正常状态、故障状态以及故障切除后改善风火打捆系统暂态稳定性的机理，并提出相应的运行状态下提高暂态稳定的控制策略，最后进行仿真验证。

1 风火打捆系统模型

1.1 DFIG等效外特性

DFIG型风火打捆送电系统如图1所示。图1中

G为火电机组，S为无穷大系统， X_1 为火电机组与变压器 T_1 电抗之和， X_2 为双回线路并联后的电抗。

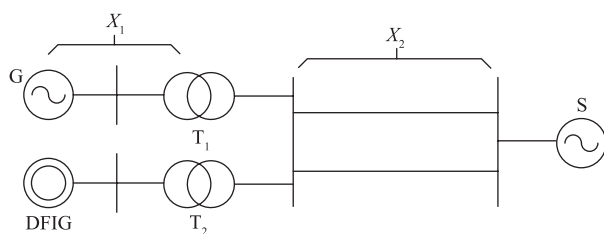


图1 DFIGN型风火打捆送电系统

Fig. 1 DFIGN type wind-thermal bundling transmission system

系统发生故障前，DFIGN通常保持恒功率因数运行，仅与系统进行有功功率交换，无功功率输出为0。

当系统发生故障引起DFIGN机端电压下降时，DFIGN将进入故障穿越模式，通过相应的控制系统调控，向系统发出一定的有功功率、无功功率。

随着故障被清除，DFIGN又逐步恢复为功率因数不变的工作模式，仅向系统输出有功功率。

由文献[12]，根据上述分析，DFIGN工作在不同的状态下，可以用相应的等效参数 Z_w 描述其等效外特性，表示DFIGN对系统的影响。故障发生前、发生后可以将 Z_w 近似为一个可变的负电阻 $-r$ ；而故障期间 Z_w 为一个可变的负电阻 $-r$ 与可变的负电抗 $-x$ 并联。DFIGN的等效阻抗与机端电压 U_s 、DFIGN输出有功功率 P_e 和无功功率 Q_e 的关系为

$$\begin{cases} r = U_s^2 / P_e \\ x = U_s^2 / Q_e \end{cases} \quad (1)$$

根据上述分析，图1所示的风火打捆送电系统可以用图2所示的等效模型表示。

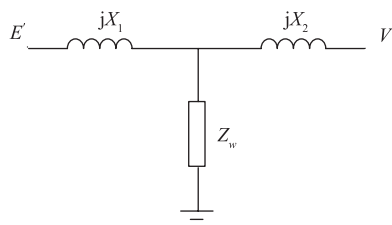


图2 风火打捆系统等效模型

Fig. 2 Equivalence model of wind-thermal bundling system

1.2 DFIGN接入对同步发电机组暂态稳定的影响

在对风电机组采用等效参数描述的情况下，图1所示火电机组向系统输送功率的特性方程^[13]可表示为

$$P_s = \frac{E'^2}{|Z_{11}|} \sin \alpha_{11} + \frac{E'V}{|Z_{12}|} \sin(\delta - \alpha_{12}) \quad (2)$$

式中， E' 为首端火电机组的电动势； V 为末端无穷大系统的电压； Z_{11} 、 Z_{12} 分别为首末端之间的输入阻抗以及转移阻抗； α_{11} 、 α_{12} 分别为输入阻抗以及转移阻抗所对应角的余角； δ 为 E' 与 V 的角度差。

由于DFIGN在不同运行阶段的等效电抗不同，因此系统的输出特性也不同。

而DFIGN接入系统前，火电向系统输送功率的特性方程^[13]为

$$P = \frac{E'V}{X_1 + X_2} \sin \delta \quad (3)$$

以图2所示正常运行状态下系统等效模型分析，此时DFIGN等效为一个负电阻 $-r$ ，可得同步发电机组输入阻抗为

$$Z_{11} = -\frac{rX_2^2}{r^2 + X_2^2} + j(X_1 + \frac{r^2X_2}{r^2 + X_2^2}) \quad (4)$$

同步发电机组输入阻抗角余角为

$$\alpha_{11} = \arctan \left[\frac{-rX_2^2}{r^2X_2 + r^2X_1 + X_1X_2^2} \right] \quad (5)$$

同步发电机组转移阻抗为

$$Z_{12} = \frac{X_1X_2}{r} + j(X_1 + X_2) \quad (6)$$

转移阻抗角余角为

$$\alpha_{12} = \arctan \left[\frac{X_1X_2}{r(X_1 + X_2)} \right] \quad (7)$$

转移阻抗模值为

$$|Z_{12}| = \sqrt{(X_1 + X_2)^2 + \left(\frac{X_1X_2}{r}\right)^2} \quad (8)$$

由式(5)可以看出输入阻抗角余角 $\alpha_{11} < 0$ ，由式(8)及式(3)可以看出此时转移阻抗模值 $|Z_{12}|$ 明显大于DFIGN未接入系统时的转移阻抗。根据式(2)火电机组向系统输送功率特性方程可得，DFIGN接入系统后使得系统输出的电磁功

率峰值较接入前明显减小, 功角特性曲线相较于DFIG接入前会向下移动; 由式(7)可得转移阻抗角余角 $\alpha_{12} > 0$, 功角特性曲线会向右移动。DFIG接入前后系统功角特性曲线对比如图3所示。图3中, P_1 、 P'_1 分别为风电机组接入前后功率曲线; δ_0 、 δ'_0 分别为DFIG接入前后同步发电机初始功角; P_T 为原动机输出的功率。由图3可见, 风电接入后, 同步发电机输出功角特性曲线向右下移动, 功角增大, 功率极限降低, 对稳定性不利。正常运行时功角特性曲线向右下移动的幅度与风电机组的出力有关。

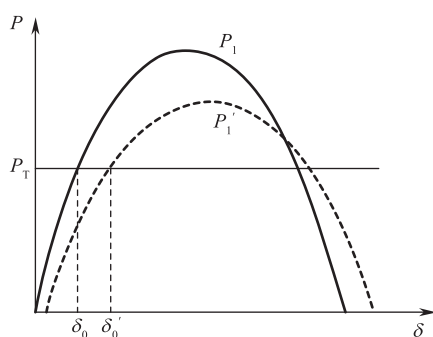


图3 DFIG接入前后功角特性曲线对比

Fig. 3 Comparison of power characteristic curves before and after DFIG connection

由式(4)~式(8)可见, 正常运行时同步发电机组转移阻抗模值 $|Z_{12}|$ 是关于线路参数 X_2 的增函数, 而同步发电机组转移阻抗模值与系统功率传输极限以及系统功角稳定性直接相关。正常运行时, 采取措施等效减小线路电抗 X_2 , 使得同步发电机组转移阻抗模值 $|Z_{12}|$ 减小, 火电机组向系统输送功率能力得到提升, 可以改善系统的暂态稳定性。而实际上不仅正常运行时输送功率极限与线路等效参数相关, 故障期间以及故障后同步发电机与系统都是通过输电线路与无限大系统相连, 输送能力也受输电线路等效电抗的影响。同时输送能力不仅与电抗有关, 也与母线电压有关。如果短路故障期间故障电流太大, 母线电压降低会很严重, 输送能力会进一步减低, 故障期间的加速动能也会增大, 从而影响系统暂态稳定性。因此通过串联接入FACT装置在故障发生前期、中期和后期不同阶段改变输电线路的等效电

抗, 对暂态稳定必将产生影响。

2 带串联补偿的复合型FCL

故障限流器FCL作为FACTS家族中的一员早在半个世纪之前就被提出, 将其应用在电力系统中能够有效抑制系统故障电流, 提高母线电压, 保障电力系统安全稳定运行。传统的故障限流器仅在故障期间发挥限流作用, 在系统正常运行时对系统基本不产生影响。而复合型故障限流器可以根据需要, 通过在正常运行和故障期间分别接入不同的元件, 等效改变接入系统参数的性质, 对系统产生不同的作用。复合型FCL的拓扑结构如图4所示。该FCL由并联电容 C 、旁路电感 L_1 、串联电感 L_2 、两个反并联的GTO及其保护电路和ZnO避雷器组成。

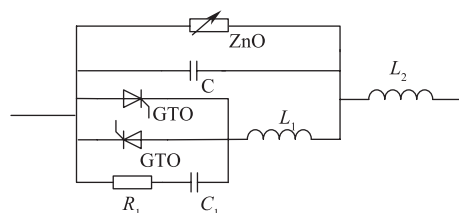


图4 复合型 FCL 拓扑结构

Fig. 4 Compound FCL topology

图4中, 旁路电感 L_1 投入系统中的等效电感值随着GTO的触发角 α 变化而变化。复合型FCL接入系统的等效电抗值与触发角 α 的关系表达式为

$$X_s(\alpha) = X_F(\alpha) = \frac{\pi X_{L_1} X_C}{\pi X_{L_1} + X_C(\alpha - \sin \alpha)} + X_{L_2} \quad (9)$$

式中, $(\alpha - \sin \alpha)$ 在 $[0, \pi]$ 区间上是关于触发角 α 的单调递增的凹函数。

当系统正常运行时, 通过控制GTO的触发角使复合型FCL工作在串补状态, 触发角应满足的条件为式(10), 且触发角的大小决定串联补偿的程度。

$$\alpha - \sin \alpha \in [0, -\frac{\pi X_{L_1}}{X_C}] \quad (10)$$

系统发生故障时, 通过控制GTO的触发角, 使复合型FCL工作在限流状态, 触发角应满足的条件为式(11), 且触发角的大小决定限制短路

电流的程度。

$$\alpha - \sin \alpha \in \left(-\frac{\pi X_{L_1}}{X_C}, \pi\right] \quad (11)$$

根据复合型FCL的工作原理及串并联关系可得参数选择时应满足的条件为

$$\frac{L_1}{\omega^2 L_1 C - 1} < L_2 < \frac{1}{\omega^2 C} \quad (12)$$

3 复合型FCL提高风火打捆系统暂态稳定性机理分析及控制策略

3.1 正常运行状态分析

在图1所示的风火打捆系统首末端之间输电线路中接入图4所示的复合型FCL，其结构如图5所示。正常运行状态下串接有复合型FCL的图5所示系统可以用图6所示的等效模型表示， $X_s(\alpha)$ 为复合型FCL正常运行时的等效电抗，此时等效电抗为容性，FCL触发角 α 应满足式(10)，其余参数与1.2节分析相同。

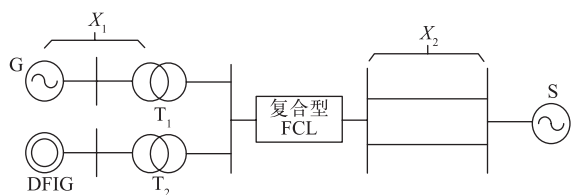


图5 加入复合型 FCL 的风火打捆系统

Fig. 5 Wind-thermal baling system with compound FCL

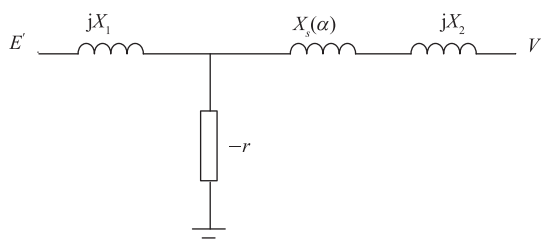


图6 正常运行状态含复合型 FCL 等效模型

Fig. 6 The normal operation state contains compound FCL equivalent model

此时，送端同步发电机组输入阻抗为

$$Z_{11} = \frac{-r[X_2 + X_s(\alpha)]^2}{r^2 + [X_2 + X_s(\alpha)]^2} + j \left[\frac{r^2[X_2 + X_s(\alpha)] + X_1 r^2 + X_1[X_2 + X_s(\alpha)]^2}{r^2 + [X_2 + X_s(\alpha)]^2} \right] \quad (13)$$

同步发电机组输入阻抗角余角为

$$\alpha_{11} = \arctan \left[\frac{-r[X_2 + X_s(\alpha)]^2}{r^2[X_2 + X_s(\alpha)] + X_1 r^2 + X_1[X_2 + X_s(\alpha)]^2} \right] \quad (14)$$

同步发电机组转移阻抗为

$$Z_{12} = \frac{X_1[X_2 + X_s(\alpha)]}{r} + j[X_1 + X_2 + X_s(\alpha)] \quad (15)$$

转移阻抗角余角为

$$\alpha_{12} = \arctan \left[\frac{X_1[X_2 + X_s(\alpha)]}{r[X_1 + X_2 + X_s(\alpha)]} \right] \quad (16)$$

转移阻抗模值为

$$|Z_{12}| = \sqrt{[X_1 + X_2 + X_s(\alpha)]^2 + \frac{X_1^2[X_2 + X_s(\alpha)]^2}{r^2}} \quad (17)$$

与1.2节分析的风火打捆系统正常运行状态下的功率特性相比，此时由于复合型FCL的接入，且 $X_s(\alpha)$ 表现为容抗，比较式(17)和式(8)可见，复合型FCL接入后 $|Z_{12}|$ 的值明显减小，减小的程度与复合型FCL的容抗有关。而根据式(2)可知，同步发电机转移阻抗模值 $|Z_{12}|$ 减小，会使得输出功率极限增大。除此之外，由式(14)可知，此时输入阻抗角余角 $\alpha_{11} < 0$ ，且由于复合型FCL的接入使得 α_{11} 相较于接入前变大，功角特性曲线上移。且由式(16)与式(7)可知，此时转移阻抗角余角减小，相应的功角特性曲线会向左移，功角减小。图3中的功角特性曲线会由 P'_1 继续上移并左移到 P''_1 ，初始运行角度由 δ'_0 减小为 δ''_0 ，如图8所示。由此增大输送能力，提高正常运行的稳定性。

3.2 故障运行状态分析

假设图5所示系统双回输电线路一回始端发生短路故障，可以等效在故障处并联不同的附加电抗 X_Δ ，等效不同的短路类型，故障期间可以控制复合型FCL为故障限流状态，触发角 α 应满足式(11)。此时FCL的等效电抗 $X_F(\alpha)$ 为感性，限制短路电流，提高母线电压。根据1.1节可知，故障期间DFIG可以等效为一对并联的可变的负电阻和负电抗，因此风火打捆系统的等效电路如图7所示。

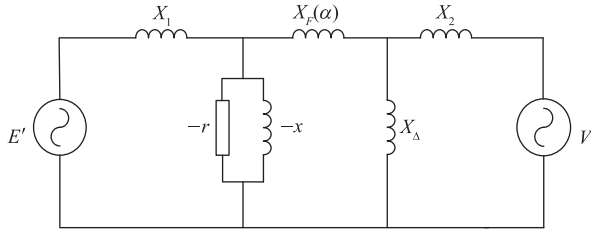


图 7 故障状态含复合型 FCL 等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit with compound FCL in fault state

当 $X_F(\alpha)=0$ 时, 表示复合型 FCL 未接入, 此时火电机组的输入阻抗为

$$Z_{11} = \frac{-\frac{1}{r}}{\left(\frac{1}{r}\right)^2 + \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{X_\Delta} - \frac{1}{X_2}\right)^2} + j \left[X_1 - \frac{\frac{1}{x} - \frac{1}{X_\Delta} - \frac{1}{X_2}}{\left(\frac{1}{r}\right)^2 + \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{X_\Delta} - \frac{1}{X_2}\right)^2} \right] \quad (18)$$

火电机组输入阻抗角余角为

$$\alpha_{11} = \frac{a_{11}}{b_{11}} = \left[\frac{-\frac{1}{r}}{\left(\frac{1}{r}\right)^2 + \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{X_\Delta} - \frac{1}{X_2}\right)^2} \right] / \left[X_1 - \frac{\frac{1}{x} - \frac{1}{X_\Delta} - \frac{1}{X_2}}{\left(\frac{1}{r}\right)^2 + \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{X_\Delta} - \frac{1}{X_2}\right)^2} \right] \quad (19)$$

火电机组的转移阻抗为

$$Z_{12} = \frac{X_1 X_2}{r} + j \left(X_1 + X_2 - \frac{X_1 X_2}{x} + \frac{X_1 X_2}{X_\Delta} \right) \quad (20)$$

转移阻抗模值为

$$|Z_{12}| = \sqrt{\frac{X_1^2 X_2^2}{r^2} + \left(X_1 + X_2 - \frac{X_1 X_2}{x} + \frac{X_1 X_2}{X_\Delta} \right)^2} \quad (21)$$

当风火打捆系统发生三相短路故障时, 附加电抗 $X_\Delta=0$, 由式 (19) 可知, 此时 α_{11} 分母为无穷大, 因此 $\alpha_{11}=0$ 。又由式 (20) 可得此时转移阻抗 $|Z_{12}|$ 为无穷大, 转移阻抗角余角接近为 0。根据式 (2) 火电机组向系统输送功率的特性方程可知, 此时火电机组基本不向系统输送功率, 功角特性曲线近似为如图 8 中的曲线 P_2 , 此时加速面积最大, 发电机转子加速能力最强, 危害系

统的暂态稳定。而接入复合型 FCL 后, 火电机组的转移阻抗为

$$Z_{12} = \frac{X_1 X_F(\alpha)}{r} + j \left(X_1 + X_F(\alpha) - \frac{X_1 X_F(\alpha)}{x} \right) \quad (22)$$

转移阻抗模值为

$$|Z_{12}| = \sqrt{\frac{X_1^2 X_F^2(\alpha)}{r^2} + \left(X_1 + X_F(\alpha) - \frac{X_1 X_F(\alpha)}{x} \right)^2} \quad (23)$$

由式 (22) 可得, 此时火电机组转移阻抗模值 $|Z_{12}|$ 为有限值, 相比于式 (20) 故障状态下复合型 FCL 接入前的系统, $|Z_{12}|$ 的值明显减小。根据式 (2) 可知, 此时火电机组输出电磁功率极限值增大, 且此时转移阻抗角余角相较于未接入复合型 FCL 时增大, 所以此时功角特性曲线会右移。因此图 8 中的功角特性曲线 P'_2 相较于未接入复合型 FCL 的功角特性曲线 P_2 会明显上移并右移。当系统发生三相短路故障后, 发电机与系统之间的联系被破坏, 其输出的功率特性突然降为 P_2 , 但转子由于其惯性作用, 状态变量 δ 不会突变。因此发电机运行点由 a 点突然降低至 b 点, 输出功率明显减小。而原动机机械功率 P_T 不变, 故会产生过剩功率。在过剩功率的影响下发电机转子将加速^[13], 其加速面积为 S_{abcd} 。当系统中接入复合型 FCL 后功角特性曲线变为 P'_2 , 此时加速面积为 S_{aefd} 。由图 8 可得, $S_{abcd} > S_{aefd}$, 即有效减小了加速面积, 风火打捆系统的暂态稳定性得到改善。

3.3 故障切除后运行状态的分析

当故障线路切除后, 此时火电机组转移阻抗为

$$Z_{12} = \frac{X_1 [2X_2 + X_s(\alpha)]}{r} + j [X_1 + 2X_2 + X_s(\alpha)] \quad (24)$$

转移阻抗模值为

$$|Z_{12}| = \sqrt{[X_1 + 2X_2 + X_s(\alpha)]^2 + \frac{X_1^2 [2X_2 + X_s(\alpha)]^2}{r^2}} \quad (25)$$

由于故障切除, 此时线路等效电抗相当于故障切除前的两倍, 即切除故障线路后同步发电机转移阻抗模值相较于正常运行时会增大。此时应调整复合型 FCL 的触发角 α , 使复合型 FCL 呈现比正常运行状态稍强的串联补偿状态, 提高

输送能力, 功角特性曲线将由图8中没有补偿时的 P_3 上移为 P'_3 。此时的减速面积 $S_{dgm} < S_{tdsn}$, 即接入复合型FCL后, 由于复合型FCL的串联补偿作用, 使得系统的减速面积增大, 有利于系统的暂态稳定。

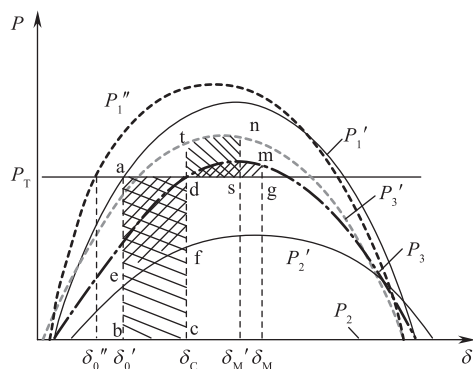


图8 各运行状态下复合型FCL接入对功角特性曲线的影响

Fig. 8 Influence of compound FCL access on power characteristic curve under different operating conditions

3.4 提高暂态稳定的复合型FCL控制策略

(1) 正常运行状态控制策略

同步发电机组转移阻抗模值是关于复合型FCL等效电抗 $X_s(\alpha)$ 的函数。使火电机组转移阻抗模值 $|Z_{12}|$ 取得极小值, 可以尽可能提高功率极限, 改善暂态稳定性。将式(17)对 $X_s(\alpha)$ 求得

$$|Z_{12}|' = -\frac{r^2 X_1 + (r^2 + X_1^2) X_2 + (X_1^2 + r^2) X_s(\alpha)}{r^2 \sqrt{[X_1 + X_s(\alpha) + X_2]^2 + \frac{X_1^2 [X_2 + X_s(\alpha)]^2}{r^2}}} \quad (26)$$

令 $|Z_{12}|' = 0$, 得到式(27)作为正常运行时最能提高功率极限的最佳补偿容抗

$$X_s(\alpha) = -\frac{r^2 (X_1 + X_2) + X_1^2 X_2}{r^2 + X_1^2} \quad (27)$$

由式(27)利用系统参数求得正常运行状态最佳补偿容抗后, 与线路取最大串补度时所对应的容抗 X_m (一般为线路电抗的70%^[16]) 作比较, 若最佳补偿容抗 $X_s(\alpha)$ 不超过线路最大补偿容抗 X_m , 则求得相应的触发角后驱动GTO触发; 反之则取最大补偿容抗 X_m 。复合型FCL的控制流程如图9所示。

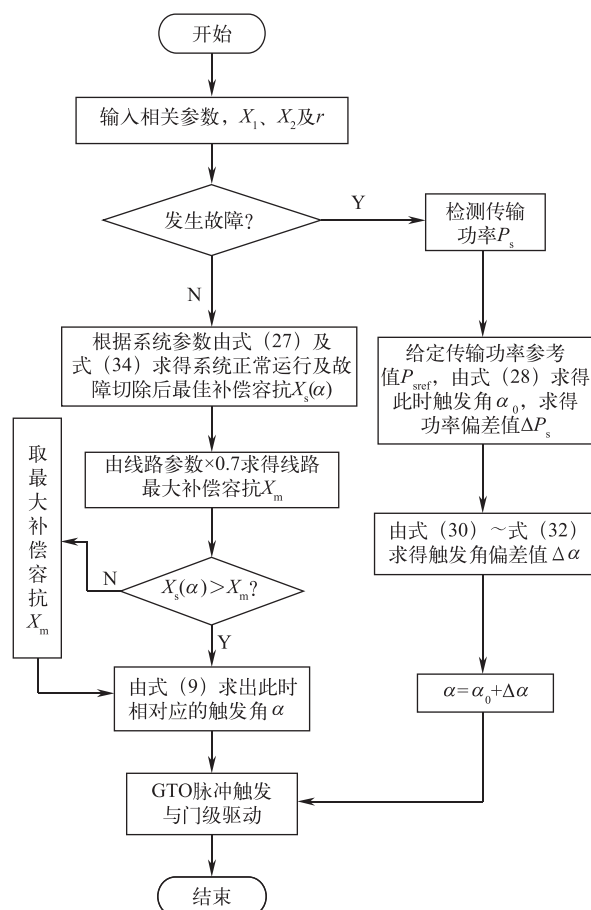


图9 复合型FCL控制策略流程图

Fig. 9 Flow chart of compound FCL control strategy

(2) 故障运行状态控制策略

将式(23)中故障状态下含复合型FCL的火电机组转移阻抗模值代入式(2)火电机组向系统输送功率特性方程中, 分析可得此时输送功率与限流电抗 $X_F(\alpha)$ 的函数关系为

$$P_s = \frac{E'^2}{|Z_{11}|} \sin \alpha_{11} + \frac{E'V \sin(\delta - \alpha_{12})}{\sqrt{aX_F^2(\alpha) + bX_F(\alpha) + X_1^2}} \quad (28)$$

由式(28)及式(11)可知, 火电机组向系统传输的功率是关于触发角 α 的非线性方程。将方程展开成泰勒级数可得

$$P_s = P(\alpha_0) + \left. \frac{\partial P_s}{\partial \alpha} \right|_{\alpha_0} (\alpha - \alpha_0) + \dots \quad (29)$$

忽略级数中的高阶无穷小项可得线性化方程为

$$\Delta P_s = K \Delta \alpha \quad (30)$$

其中

$$K = -\frac{E'V \sin(\delta - \alpha_{12})}{2\sqrt{(aX_F^2(\alpha_0) + bX_F(\alpha_0) + X_1^2)^3}} \left[\frac{\pi X_{L_1} X_C^2 (1 - \cos \alpha_0) [-2aX_F(\alpha_0) + b]}{[\pi X_{L_1} + X_C(\alpha_0 - \sin \alpha_0)]^2} \right] \quad (31)$$

$$\begin{cases} a = \left[X_1^2 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{x^2} \right) - \frac{2X_1}{x} + 1 \right] \\ b = 2X_1 \left(1 - \frac{X_1}{x} \right) \end{cases} \quad (32)$$

故障状态下通过控制GTO的触发角 α 改变复合型FCL接入系统的等效电抗,当系统受到扰动传输功率与参考功率值存在偏差时,由式(30)~式(32)得到触发角修正量 $\Delta\alpha$,再与传输功率参考值对应的触发角 α_0 相加得到触发角 α 。修正后的触发角再经过触发脉冲与门级驱动电路,得到门级触发脉冲。

(3) 故障切除后运行状态

切除故障后,线路电抗变为正常状态时的2倍,此时同步发电机组转移阻抗模值对 $X_s(\alpha)$ 求导有

$$|Z_{12}|' = -\frac{r^2 X_1 + (r^2 + X_1^2) 2X_2 + (X_1^2 + r^2) X_s(\alpha)}{r^2 \sqrt{[X_1 + X_s(\alpha) + 2X_2]^2 + \frac{X_1^2 [2X_2 + X_s(\alpha)]^2}{r^2}}} \quad (33)$$

令 $|Z_{12}|'=0$,可得此时 $X_s(\alpha)$ 最佳补偿容抗为

$$X_s(\alpha) = -\frac{r^2 (X_1 + 2X_2) + 2X_1^2 X_2}{r^2 + X_1^2} \quad (34)$$

与正常运行状态类似,控制框图如图9所示。求得故障切除后复合型FCL的最佳补偿容抗后,与线路最大补偿容抗 X_m 作比较后得出相应的触发角 α 驱动GTO触发,对线路进行串联补偿。

4 仿真验证

为验证以上理论分析,利用MATLAB/Simulink仿真软件搭建风火打捆系统模型,其中风电火电比例设置为1:2,火电机组容量设置为120 MW,风电场含有40台额定容量为1.5 MW的双馈风电机组,额定运行状态下风电场出力为60 MW。系统运行时间为10 s,在5.0 s时在图5所示系统双回输电线路一回始端发生三相短路故障,故障发生0.2 s后故障线路被切除。仿真结果如图10~图14所示。

复合型FCL参数为^[15]: $C=589.7 \mu\text{F}$, $L_1=$

5.3 mH, $L_2=12.8 \text{ mH}$ 。根据式(10)及式(11)计算可得复合型FCL工作在串补状态时触发角 α 取值范围为 $[0, 109.49^\circ]$,串补容抗可调范围为 $[-1.37 \Omega, -413.14 \Omega]$ 。工作在限流状态时触发角 α 的取值范围为 $(109.49^\circ, 180^\circ]$,限流电抗可调范围为 $[6.42 \Omega, 458.86 \Omega]$ 。代入参数由式(27)及式(34)可得系统正常运行及故障切除后的最佳补偿容抗与触发角 α 的对应关系见下表。此外,根据仿真参数计算可得最大线路补偿容抗为 -26.55Ω 。

表 最佳补偿容抗及触发角

Tab. Optimum series complement capacity and trigger angle

	最佳补偿容抗/ Ω	GTO 触发角 α ($^\circ$)
正常运行时	-20.31	99.677
故障切除后	-24.44	101.198

由图10a可知,风火打捆系统在发生三相短路故障时,发电机与系统间的联系被破坏,功角迅速增大且振荡强烈,峰值达到 168.52° ;故障切除后,虽然功角曲线振荡幅度有所减小,但振荡持续时间很长。故障发生时分别取功率参考值 P_{sref} 为0.2及0.5, P_{sref} 为0.2时,所对应的触发角 α_0 为 123.95° 。由仿真数据可得发生三相短路故障时,传输功率跌落到0.02 (pu),触发角偏差为4.01,可得此时触发角 α 为 127.96° ,限流电抗为 14.97Ω ,功角曲线峰值为 151.1° 。 P_{sref} 为0.5时,所对应的触发角 α_0 为 122.19° ,触发角偏差为 4.58° ,可得此时触发角为 117.61° ,限流电抗为 30.38Ω ,功角曲线峰值为 125.8° ,此时功角曲线对比如图10b所示。由此可见,在复合型FCL的作用下,故障期间由于故障限流器的作用,切除故障后,不仅功角振荡幅度减小,而且持续时间明显减少,系统很快实现功角稳定。

由图11可知,同步发电机组输出电磁功率在发生故障后持续振荡,且故障期间传输功率仅为0.02 (pu),而在复合型FCL作用下,传输功率分别控制在0.2 (pu)及0.5 (pu),且在故障切除后能够使得电磁功率曲线保持稳定,系统暂态

稳定性得到提升。

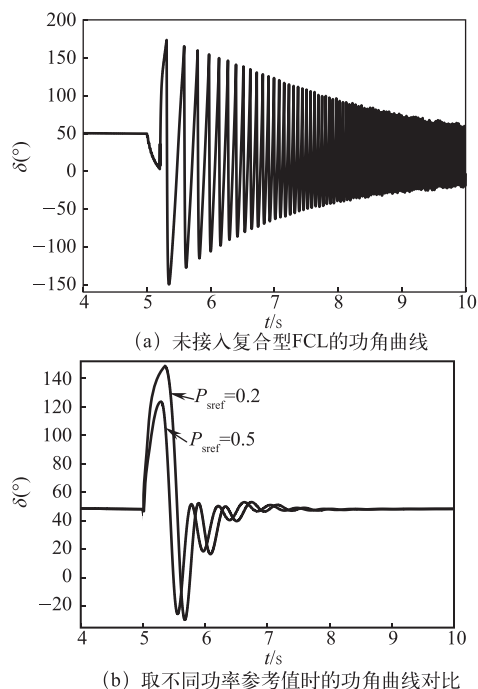


图 10 功角曲线对比

Fig.10 Comparison of power angle curves

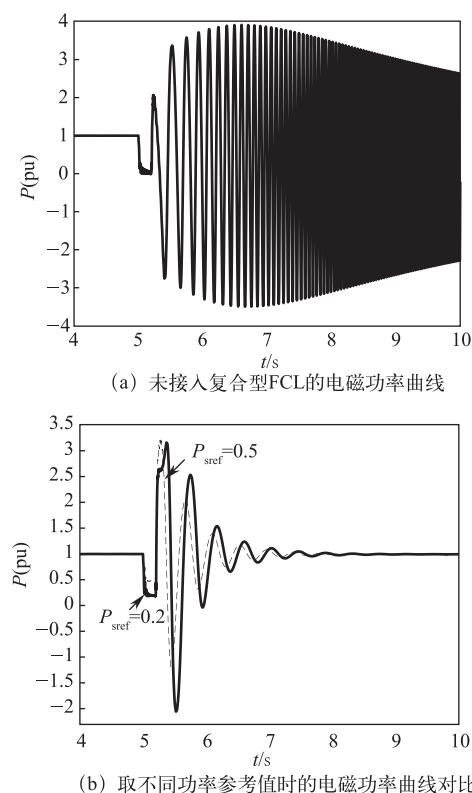


图 11 电磁功率曲线对比

Fig. 11 Electromagnetic power curve comparison

由图12可知，在复合型FCL接入前，故障期间电压仅为0.15 (pu)，且故障切除后电压波动明显。而在复合型FCL接入后，故障期间传输电压为0.45 (pu) 及0.6 (pu)，且在故障切除后电压趋于稳定。

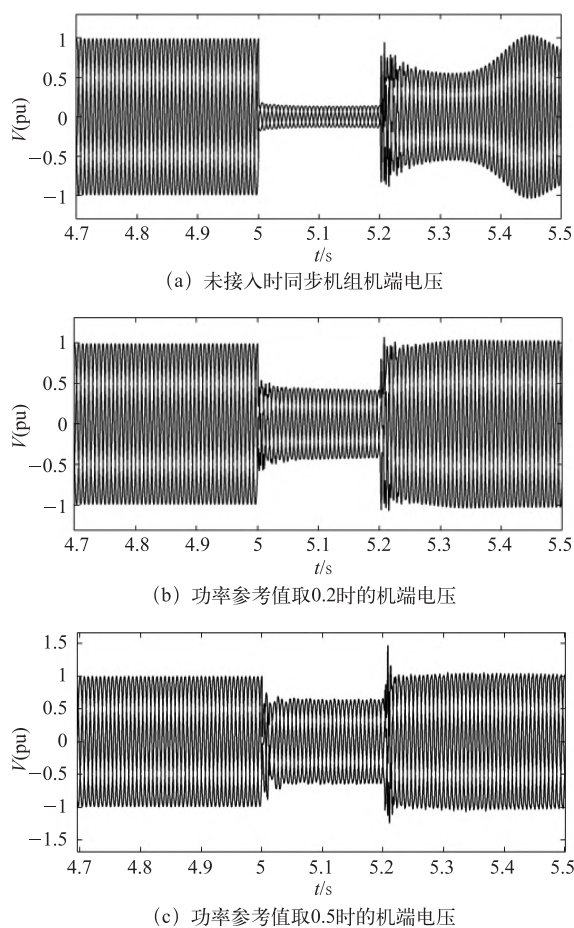


图 12 同步机组机端电压对比

Fig. 12 Comparison of terminal voltage of synchronous unit

由图13可知，在复合型FCL接入前，故障期间电流峰值为3.5 (pu)。而在复合型FCL接入后，故障期间传输电流峰值为2.65 (pu) 及2.15 (pu)，有效减小了故障电流。且通过调节触发角能够使复合型FCL在正常运行及故障切除后取得最佳补偿容量，使机端电压更稳定，故障电流更小。

仿真结果表明，复合型FCL的接入，不仅限制了短路故障期间的故障电流，而且稳定了机端电压，有利于风火打捆系统的暂态稳定性。在控制策略的作用下，系统暂态稳定性进一步提高，

验证了理论分析的正确性。

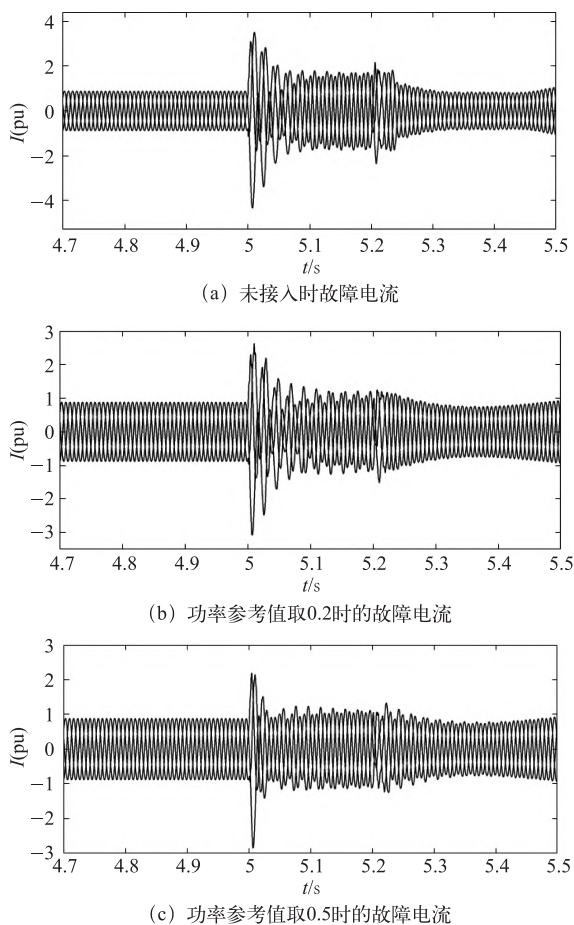


图 13 故障电流对比

Fig. 13 Fault current comparison

5 结束语

本文通过研究双馈风电机组等值外特性，确定了不同运行状态下双馈风电机组等值参数，通过分析对应状态下的功率特性方程，研究其功角特性曲线的变化，进而分析对风火打捆系统暂态稳定的影响。

通过对风火打捆系统正常运行状态分析可知，由于风电机组的加入，使得系统功率传输极限降低，削弱系统的暂态稳定性。

通过对风火打捆系统含具有串补功能复合型FCL的功率方程进行分析，说明了提高暂态稳定的机理；根据复合型FCL的工作原理制定了改善风火打捆系统暂态稳定的控制策略。结果表明正常运行状态下，通过控制触发角使得复合型FCL

为容性，可以有效提高风火打捆系统功率输送能力，提高稳定裕度；短路故障状态下，控制复合型FCL为感性，能够限制短路电流、提高母线电压，提高输送功率，减小加速面积，减小功率振荡的幅度，有利于提高暂态稳定；故障切除后，控制复合型FCL为强补偿状态，能有效稳定故障后同步机组机端电压，增强功率输送能力，增大减速面积，缩短了故障切除后功率振荡持续的时间，很好地改善了系统的暂态稳定性。

参考文献

- [1] 白建华, 辛颂旭, 贾德香, 等. 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 14-17.
- [2] 刘斯伟, 李庚银, 周明. 双馈风电机组对并网电力系统暂态稳定性的影响模式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 471-476.
- [3] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7-11, 17.
- [4] 牟澎涛, 赵冬梅, 王嘉成. 大规模风电接入对系统功角稳定影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1325-1334.
- [5] 郝正航, 余贻鑫, 曾沅. 双馈风力发电机功角暂态行为及其控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 79-83.
- [6] CHOWDHURY M A, HOSSEINZADEH N, SHEN W X, et al. Comparative study on fault responses of synchronous generators and wind turbine generators using transient stability index based on transient energy function[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 51(10): 145-152.
- [7] 陈树勇, 陈会员, 唐晓骏, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J]. 电网技术, 2013, 37(02): 514-519.
- [8] 高磊, 褚晓杰, 汤涌, 等. 电力系统多FACTS交互作用与协调控制综述[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3749-3755.

- [9] 邹亮, 张秀群, 赵彤, 等. 永磁偏置型故障限流器对系统暂态稳定性的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 594-601.
- [10] SUNG B C, PARK D K, PARK J-W. Study on a seriesresistive SFCL to improve power system transient stability modeling, simulation and experimental verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 17(2): 1863-1866.
- [11] 李娟, 孙康杰, 李方媛, 等. 故障限流器改善风火打捆系统暂态稳定性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 245-252.
- [12] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399-3405.
- [13] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
- [14] 李娟, 李方媛, 王鹏, 等. 限流式SSSC提高DFIG型风火打捆系统暂态稳定分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 68-76.
- [15] 曾琦, 李兴源, 蔡鑫贵, 等. 带串联补偿故障限流器的仿真和实验[J]. 电力系统自动化, 2003(14): 54-56.
- [16] 颀雅迪. 特高压高补偿度串补线路断路器开断后暂态特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020.

作者简介

石帅 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为含FACTS的风火打捆系统暂态稳定。

(收稿日期: 2023-11-03)