

双馈风机接入对系统极限切除角的影响*

张雪娟¹, 吴水军², 孙士云¹, 王 杨¹, 郑新宇¹, 赵 伟¹

[1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650217]

摘要: 风电场的大规模接入对电网暂态稳定性造成的影响不容忽视。以含双馈风电机组的扩展两机系统为例, 建立了双馈风机等值模型, 将两机系统等值成单机无穷大系统, 依据等面积法则详细推导了风电接入后系统极限切除角的解析式, 进而定量分析了极限切除角随风电比例、风机并网位置、故障位置和负荷接入位置等 4 个影响因素的变化趋势, 总结出 4 种影响因素对暂态功角稳定性的影响规律。在 BPA 和 FASTEST 中分别建立含双馈风机的扩展双机系统的仿真模型, 对理论分析工作的正确性进行了仿真实验。

关键词: 双馈风机; 极限切除角; 暂态功角稳定性

中图分类号: TM 614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)09-0085-10

Impact on Critical Clearing Angle with Doubly-Fed Induction Generator Connected to Power System*

ZHANG Xuejuan¹, WU Shuijun², SUN Shiyun¹, WANG Yang¹, ZHENG Xinyu¹, ZHAO Wei¹

[1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Electric Power Test & Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China]

Abstract: The impact of large-scale access of wind farms on the transient stability of power grids could not be ignored. Taking the extended two-machine system with doubly-fed wind turbines as an example, the equivalent model of doubly-fed induction generator was established, and the two-machine system could be equivalent to a single-machine infinity system. Based on the law of equal area, the analytic formula of critical clearing angle of the system was deduced in detail after wind power accessed. The analytic formula was used to quantitatively analyze the variation trends of the critical clearing angle with wind power ratio, wind turbine grid connection position, fault location and load access position. The influence laws of the above four factors on the stability of transient power angle were summarized. The simulation models of the extended two-machine system with doubly-fed induction generator was established in BPA and FASTEST, and the accuracy of the theoretical analysis was verified.

Key words: doubly-fed induction generator; critical clearing angle; transient angle stability

0 引言

随着大规模风电接入电网, 导致电网中增加了大量行为特征未知的风电电源, 对电网的暂态稳定性造成一定的影响, 因而需要对含风电电力

系统的暂态稳定性进行重新分析与判断^[1-3]。研究含风电电力系统的暂态稳定性问题变得越来越紧迫。目前, 国内外关于该问题的研究大致可以分为时域仿真法和直接法两大类^[4-9]。

文献[10]分析了系统故障对双馈风机的影

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51367009)

作者简介: 张雪娟(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为含风电电力系统暂态稳定性分析。

吴水军(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源接入对电力系统的影响。

孙士云(1981—), 女, 副教授, 研究方向为含风电电力系统暂态稳定性分析。

响以及风电比例、风场功率因数以及其他并网条件对系统暂态稳定性的影响。文献[11]提出以线路临界故障清除时间、故障时风力发电机接入母线电压为指标,研究了发生外部三相短路故障时对电力系统本身和风力发电机组的影响;对比分析了在同一接入点分别接入不同容量的风电场时系统对应的稳定特性和对风电场母线电压的冲击;风机接入不同的节点时对二者的不同影响程度。文献[12]根据双馈风机故障行为特性给出了双馈风机等效外特性。基于等面积定则定性分析了双馈风电机组接入单端送电系统后有功控制策略和无功控制策略在暂态过程中对系统暂态稳定性的影响,在理论分析基础上进行了时域仿真验证,验证了理论分析的正确性。文献[13]指出因为风电机组惯性时间常数较小,风电机组在故障过程中,机械功率和电磁功率会随着机端电压的下降而发生改变。因此将风电场的机械功率和电磁功率等值为系统机械功率的一部分,分析了系统等值机械功率在暂态过程中的变化规律,建立了含风电电力系统的扩展等面积法则^[14-16],并验证了其有效性。文献[10-11]以仿真分析为主,文献[12-13]则将定性分析与仿真计算相结合,总结了控制策略、风电出力、风场并网条件等影响因素对含风电系统暂态稳定性的影响规律。

文献[17-18]采用直流潮流模型,忽略电力线路电阻,并将故障期间同步机电磁功率近似为零,将双馈风机作为有功功率源接入电力系统^[19],得出了风电比例、风机接入位置与暂态过程中同步机功角差变化量的关系式,对暂态稳定机理进行了分析,并分析了影响暂态稳定的因素。文献[20]得到了三相短路故障下具备低电压穿越能力的双馈风电机组阻抗等效模型。其次,推导了双馈风电直接接入与等容量替换同步机时的系统同步机功角特性方程,并分析了风电接入比例与传输线电抗对功角特性方程的影响,以及2种风电接入方式对系统加减速度面积、不稳定平衡点、稳定裕度的影响特性。最后,利用等面积准则分析了双馈风电接入对暂态功角稳定的影响。文献[18,20]分别采用功角差和稳定裕度作为评判风电接入后系统暂态功角稳定性优劣的指标,而采用等面积法则对系统暂态功角稳定性进行分析时,极限切除角的大小也可以直接表征系统稳定

性的变化趋势。

本文将极限切除角作为评价含风电系统的暂态稳定性的指标,在含双馈风电机组的扩展双机系统中,首先建立正常、故障和故障清除后前期3种运行状态下双馈风机的等值模型。在此基础上,依据等面积法则分析双馈风机接入对系统极限切除角的影响规律。

1 极限切除角推导

以含双馈风机的扩展双机系统为例,同步发电机1、2通过双回线路AD相连,双馈风机在B母线处并网,C母线处接入负荷,如图1所示。图1中T1、T2、T3分别为发电机1、发电机2、双馈风机的变压器。

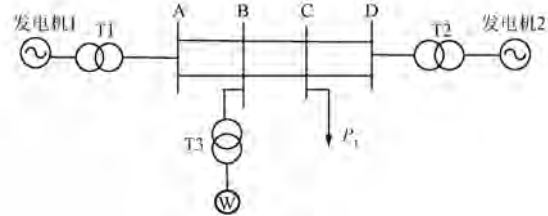


图1 扩展双机系统接线图

同步发电机1、2的运动方程分别为

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} \quad (1)$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} \quad (2)$$

式中： M_1 、 M_2 ——同步发电机1、2的惯性时间常数；

δ_1 、 δ_2 ——同步发电机1、2的功角；

P_{m1} 、 P_{m2} ——同步发电机1、2的机械功率；

P_{e1} 、 P_{e2} ——同步发电机1、2的电磁功率。

两同步机功角差为 $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$, 式(1)与式(2)相减得：

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = \left(\frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{P_{m2}}{M_2} \right) - \left(\frac{P_{e1}}{M_1} - \frac{P_{e2}}{M_2} \right) \quad (3)$$

对式(3)进行整理可得：

$$M_{12} \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_{m12} - P_{e12} \quad (4)$$

$$M_{12} = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad (5)$$

$$P_{m12} = \frac{M_2 P_{m1} - M_1 P_{m2}}{M_1 + M_2} \quad (6)$$

$$P_{e12} = \frac{M_2 P_{e1} - M_1 P_{e2}}{M_1 + M_2} \quad (7)$$

式中： M_{12} 、 δ_{12} ——同步发电机组 S 的等值惯性时间常数和功角；

P_{m12} 、 P_{e1} ——系统的等值机械功率和等值电磁功率。

则式(3)即为等值扩展单机无穷大系统的转子运动方程。系统接线如图 2 所示。同步发电机 S 为等值同步发电机组。图 2 中 TS、TR 分别为发电机 S、无穷大系统的变压器。

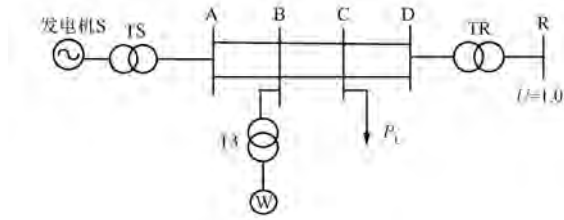


图 2 扩展单机无穷大系统接线图

上述扩展双机系统中,风力发电机的并网改变了系统的潮流,系统节点电压的相位、幅值随之改变,将影响同步机的电磁功率 P_e ;而在大扰动情况下,电磁功率 P_e 与机械功率 P_m 不平衡,会导致转子运动发生变化,功角发生摆动,从而使系统的暂态功角稳定性发生变化。

1.1 正常运行

双馈风机通常采用恒功率因数控制,正常情况下只向系统提供有功功率,系统发生故障后,故障期间双馈风机发出一定的无功功率供给系统,故障后有功功率开始恢复。故障发生前,向系统注入有功功率,无功功率为零,故将双馈风机等效为负电阻 r_w [21]。等值电阻由风机并网点电压和风机的有功功率决定:

$$r_w = \frac{U_B^2}{P_w} \quad (8)$$

式中： U_B ——双馈风机并网点电压；

P_w ——双馈风机的有功功率。

双馈风机的等值模型建立后,可画出正常运行时系统的等值电路图,如图 3 所示。图 3 中, K_1 为风电比例; K_2 为风机并网点距 A 母线长度占线路 AD 全长百分比; K_4 为负荷接入位置距 A 母线

长度占线路 AD 全长百分比; X_{IT} 为同步发电机 S 的暂态电抗与其变压器 T1 电抗之和; X_{T2} 、 X_{T3} 分别为无穷大系统变压器和双馈风机变压器的电抗值; X_L 为 AD 单回线路的电抗值。下文分析中假设 AB、BC、CD 线路单位长度阻抗相等。

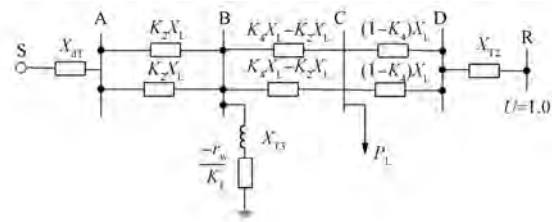


图 3 正常运行时系统等值电路图

双馈风机接入扩展双机系统后,会导致系统的潮流发生改变,系统的节点导纳矩阵发生变化 [22]。由图 3 可以写出正常运行时含双馈风电系统的节点导纳矩阵 Y_1 ,将节点 S 和 R 设为边界节点,节点 A、B、C、D 设为外部节点,用 WARD 等值法对节点导纳矩阵进行化简,只保留 S 和 R 2 个节点,消去外部节点。根据式(9)计算得到正常运行时节点 S 和节点 R 之间的互导纳 Y'_{SR0} ,即同步发电机与无穷大系统之间的等值互导纳:

$$\bar{Y}_{BB0} = Y_{BB0} - Y_{BE0} Y_{EE0}^{-1} Y_{EB0} = \begin{bmatrix} Y'_{SS0} & Y'_{SR0} \\ Y'_{RS0} & Y'_{RR0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

假设等值同步机 S 的暂态电动势 E' 在整个暂态过程中保持不变。将式(9)中的 Y'_{SR0} 代入式(10),可以得到正常运行情况下发电机 S 与无穷大系统之间的功角差 δ_0 :

$$\delta_0 = \arctan \frac{-P_1}{U \cdot Y'_{SR0} - Q_1} \quad (10)$$

式中： P_1 、 Q_1 ——正常运行时无穷大系统发出的有功功率和无功功率；

U ——无穷大系统母线电压。

求得正常运行时发电机 S 与无穷大系统之间的互导纳 Y'_{SR0} 和功角差 δ_0 后,可以计算出等值同步发电机 S 的电磁功率 P_1 及其最大值 P_{IM} :

$$P_1 = -Y'_{SR0} \cdot U \cdot \sin \left(\arctan \frac{-P_1}{U \cdot Y'_{SR0} - Q_1} \right) \quad (11)$$

$$P_{IM} = -Y'_{SR0} \cdot U \quad (12)$$

1.2 三相金属性短路故障

由于故障期间,机端电压下降,具备低电压穿越能力的双馈风机在控制系统的作用下,发出无功功率,向系统提供无功支撑,因此可以将风机等效为一个并联的负电阻 r_w 和负电抗 X_w 。等值电抗 X_w 由风机并网点电压和风机的无功功率决定,其表达式为:

$$X_w = \frac{U_B^2}{Q_w} \quad (13)$$

式中: U_B —— 双馈风机并网点电压;

Q_w —— 双馈风机发出的无功功率。

假设系统中线路 AB 的一回输电线路 b 点发生三相金属性短路故障,系统等值电路图如图 4 所示。 K_3 为故障位置距 A 母线长度占线路 AB 全长百分比。

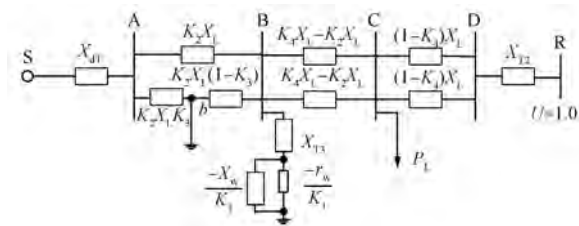


图 4 发生三相金属性短路故障的系统等值电路图

在建立的双馈风机等值模型的基础上,根据故障发生时的系统等值电路图写出系统的节点导纳矩阵 Y_2 ,用 WARD 等值法对节点导纳矩阵进行化简,只保留 S 和 R 2 个节点,消去外部节点。由式(14)计算得到等值同步发电机 S 和无穷大系统之间的互导纳 Y'_{SR1} :

$$\tilde{Y}_{BB1} = Y_{BB1} - Y_{BE1} Y_{EE1}^{-1} Y_{EB1} = \begin{bmatrix} Y'_{SS1} & Y'_{SR1} \\ Y'_{RS1} & Y'_{RR1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(14)中的 Y'_{SR1} 代入式(15),得到故障发生时发电机 S 与无穷大系统之间的功角差 δ_1 :

$$\delta_1 = \arctan \frac{-P_2}{U \cdot Y'_{SR1} - Q_2} \quad (15)$$

式中: P_2, Q_2 —— 短路故障期间无穷大系统发出的有功功率和无功功率。

求得故障期间等值同步机 S 和无穷大系统之间的互导纳 Y'_{SR1} 和功角差 δ_1 后,可以计算出等值同步发电机 S 的电磁功率 P_{II} 及其最大值 P_{IIM} :

$$P_{II} = - Y'_{SR1} \cdot U \cdot \sin \left(\arctan \frac{-P_2}{U \cdot Y'_{SR1} - Q_2} \right) \quad (16)$$

$$P_{IIM} = - Y'_{SR1} \cdot U \quad (17)$$

1.3 故障切除后前期

故障切除后前期,将风机等效为一个并联的负电阻 r_w 和负电抗 X_w 。故障切除后前期系统等值电路图如图 5 所示。故障线路切除后,传输线 AB 单回运行。

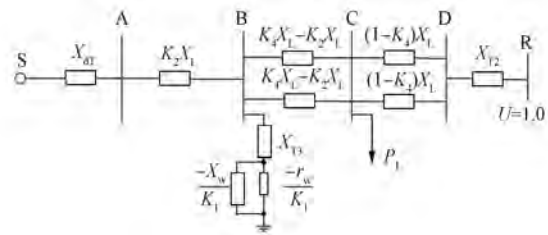


图 5 故障切除后前期系统等值电路图

根据图 5 写出系统的节点导纳矩阵 Y_3 ,用 WARD 等值法对节点导纳矩阵进行化简,只保留 S 和 R 2 个节点,消去外部节点。根据式(18)计算得到等值同步发电机 S 和无穷大系统之间的互导纳 Y'_{SR2} :

$$\tilde{Y}_{BB2} = Y_{BB2} - Y_{BE2} Y_{EE2}^{-1} Y_{EB2} = \begin{bmatrix} Y'_{SS2} & Y'_{SR2} \\ Y'_{RS2} & Y'_{RR2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

将式(18)中的 Y'_{SR2} 代入式(19),得到等值发电机 S 与无穷大系统之间的功角差 δ_2 :

$$\delta_2 = \arctan \frac{-P_3}{U \cdot Y'_{SR2} - Q_3} \quad (19)$$

式中: P_3, Q_3 —— 故障切除后前期无穷大系统发出的有功功率和无功功率。

求得等值同步发电机 S 和无穷大系统之间的互导纳 Y'_{SR2} 和功角差 δ_2 后,可以计算出等值同步发电机 S 的电磁功率 P_{III} 及其最大值 P_{IIIM} :

$$P_{III} = - Y'_{SR2} \cdot U \cdot \sin \left(\arctan \frac{-P_3}{U \cdot Y'_{SR2} - Q_3} \right) \quad (20)$$

$$P_{IIIM} = - Y'_{SR2} \cdot U \quad (21)$$

综合上述分析可知,系统在正常、故障和故障清除前期 3 种运行状态下,风电比例 K_1 、风机并网位置 K_2 、故障位置 K_3 和负荷接入位置 K_4 的改

变都会影响等值同步发电机 S 和无穷大系统之间的等值阻抗,进而引起电磁功率和系统极限切除角的变化。

3 种运行状态下等值同步发电机的功率特性曲线如图 6 所示。

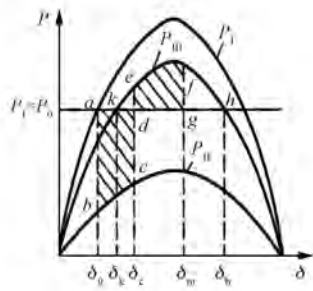


图 6 3 种运行状态下等值同步发电机的功率特性曲线

图 6 中, δ_h 为最大允许摇摆角,即为了保持系统的稳定,在到达 h 点前使转子恢复同步速度,极限的情况是正好达到 h 点时转子恢复同步速度,此时的切除角度为极限切除角 δ_{cm} ,在极限切除角时切除故障线路,已经利用了最大可能的减速面积,只要切除角小于极限切除角,系统总是稳定的。因此极限切除角越大,系统的暂态稳定性越好。最大允许摇摆角可由式(22)求得:

$$\delta_h = \pi - \arcsin \frac{P_0}{-Y'_{SR2} \cdot U} \quad (22)$$

式中: P_0 ——机械功率。

分别将式(10)、式(17)、式(21)、式(22)代入式(23),求得含双馈风机扩展双机系统的极限切除角 δ_{cm} :

$$\delta_{cm} = \arccos \left[\frac{P_T(\delta_h - \delta_0) + P_{III} \cos \delta_h - P_{IIM} \cos \delta_0}{P_{III} - P_{IIM}} \right] \quad (23)$$

δ_{cm} 的详细表达式见附录 A。

2 影响因素理论分析和仿真验证

从理论变化和仿真验证 2 个角度,逐一分析上述 4 种影响因素对极限切除角的影响。分别在 BPA 和 FASTEST 仿真平台中建立图 1 所示含双馈风机的扩展双机系统的仿真模型。仿真结果中采用转子抵达极限切除角所需的时间即极限切除时间(CCT)和发电机功角差来表征系统暂态功角的稳定性。

双馈风机单机容量为 1.5 MW,额定电压为 0.69 kV;同步发电机 S 的电压为 16.5 kV,发电机动能为 2 364 MW/s。仿真模型中同步机组模型采用 E' 恒定的发电机模型,负荷采用恒阻抗模型。发电机、变压器和线路电抗的标么值如表 1 所示。

表 1 发电机、变压器和线路电抗的标么值

X_{dT}	X_{T2}	X_{T3}	X_L
0.241	0.057	0.024	0.2

2.1 风电比例

2.1.1 双馈风电直接接入

考虑风电比例对系统暂态稳定性的影响,系统的总有功出力随着风电比例增加而增加,保持系统的同步发电机有功出力不变。图 2 系统中,以线路 AB 首端发生三相金属性短路故障为例,即 K_3 为零;风机在 A 母线处并网,即 K_2 为零;恒阻抗负荷采用就地消纳方式,即 K_4 为零。将各元件参数以及 K_2 、 K_3 、 K_4 的值代入式(23),得到含双馈风机的扩展双机系统的极限切除角随风电比例的变化趋势图,如图 7 所示。

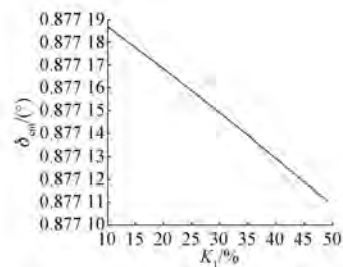


图 7 双馈风电直接接入 δ_{cm} 变化趋势图

仿真计算得到 CCT 与 K_1 之间的变化关系曲线如图 8 所示。风电比例为 10%~50% 时得到的功角摇摆曲线如图 9 所示。

由图 7~图 9 可以看出,理论分析结果为随

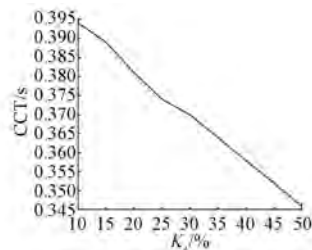


图 8 CCT 与 K_1 之间的变化关系曲线

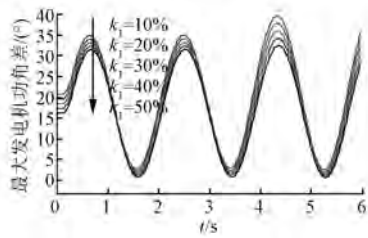


图9 双馈风电直接接入功角摇摆曲线

随着风电比例的增加,极限切除角逐渐减小,含双馈风电的扩展双机系统的暂态功角稳定性减弱;仿真结果中,系统的功角稳定 CCT 随着 K_1 的增大逐渐减小。功角差随着 K_1 的增加逐渐增大,系统暂态功角稳定性变差。可见仿真结果与理论分析一致。

2.1.2 双馈风电等容量替换同步机有功出力

保持系统的总有功出力不变,通过改变双馈风机的有功出力占系统总有功出力的百分比来实现风电比例的变化。以图 2 所示系统线路 AB 首端发生三相金属性短路故障为例,即 K_3 为零;风机在 A 母线处并网,即 K_2 为零;恒阻抗负荷采用就地消纳方式,即 K_4 为零。将各元件参数及 K_2 、 K_3 、 K_4 的值代入式(23),得到含双馈风机的扩展双机系统的极限切除角随风电比例的变化趋势图,如图 10 所示。

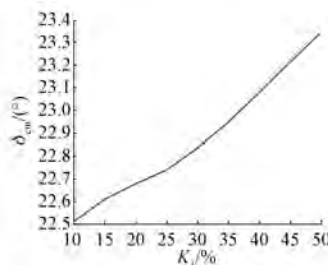


图10 双馈风电等容量替换 δ_{cm} 变化趋势图

仿真计算得到的双馈风电等容量替换 CCT 值如图 11 所示。 K_1 分别为 10% ~ 50% 时得到的功角摇摆曲线如图 12 所示。

由图 10~图 12 可以看出,理论分析结果为随着风电比例的增加,极限切除角逐渐增大,含双馈风电的扩展双机系统的暂态功角稳定性更好;仿真结果中,系统的 CCT 随着 K_1 的增大逐渐增大,功角差随着 K_1 的增加逐渐减小,系统暂态功角稳定性变好。可见仿真结果与理论分析一致。

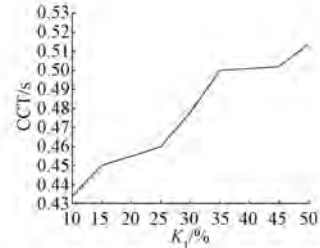


图11 双馈风电等容量替换 CCT 值

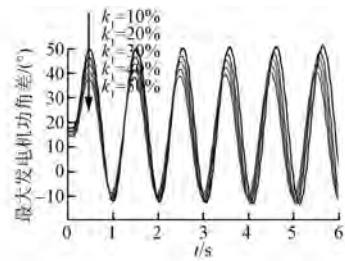


图12 双馈风电等容量替换功角摇摆曲线

2.2 风机并网位置

考虑风机并网位置变化对含双馈风机的扩展双机系统的极限切除角的影响时,风机接在 B 母线上,通过改变母线 A 与母线 B 之间的线路电抗值占母线 A 与母线 D 之间的线路电抗值的百分比来实现风机并网位置的变化。图 2 所示系统中,恒阻抗负荷采用就地消纳方式,即 K_4 为零;风电比例 K_1 为 10%;以故障发生于线路 AB 末端为例,即 K_3 为 100%。将各元件参数及 K_1 、 K_3 、 K_4 的值代入式(23),得到含双馈风机的扩展双机系统的极限切除角随风机并网位置的变化趋势图,如图 13 所示。

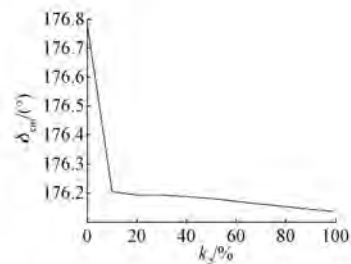


图13 考虑风机并网位置 δ_{cm} 变化趋势图

仿真计算得到 CCT 与 K_2 之间的变化关系如图 14 所示。风机并网位置距离 A 母线长度占线路 AD 全长百分比分别为 0~100% 时得到的功角摇摆曲线如图 15 所示。

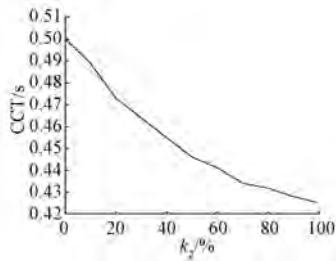


图 14 考虑风机并网位置 CCT 值

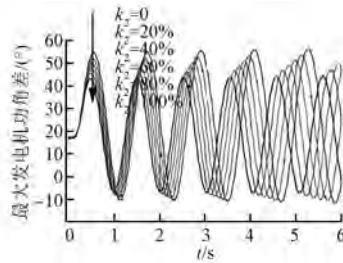


图 15 考虑风机并网位置功角摇摆曲线

由图 13~图 15 可以看出,理论分析结果为随着风机并网位置离等值同步机侧越远,极限切除角逐渐减小,越不利于含双馈风电的扩展双机系统的暂态功角稳定性;仿真结果中,风机并网位置离等值同步机侧越远,系统的 CCT 随着风机并网位置的变化而变化,功角差越大,越不利于系统的暂态功角稳定性。可见仿真结果与理论分析一致。

2.3 故障位置

图 2 所示系统中,故障发生于母线 A 与母线 B 之间,风电比例 K_1 为 30%; 风机并网位置距母线 A 长度占线路全长的 50%, 即 K_2 为 50%; 恒阻抗负荷采用就地消纳方式, 即 K_4 为零。将各元件参数及 K_1 、 K_2 、 K_4 的值代入式 (23), 得到含双馈风机的扩展双机系统的极限切除角随故障位置的变化趋势图, 如图 16 所示。

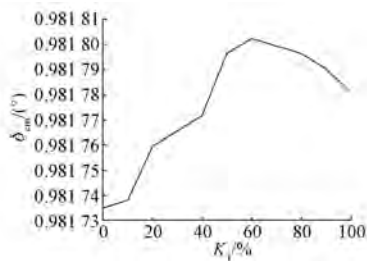


图 16 考虑故障位置 δ_{cm} 变化趋势图

仿真计算得到的 CCT 与 K_3 之间的变化关系如图 17 所示。故障位置距离 A 母线长度占线路

AB 全长百分比分别为 0~100% 时得到的功角摇摆曲线如图 18 所示。

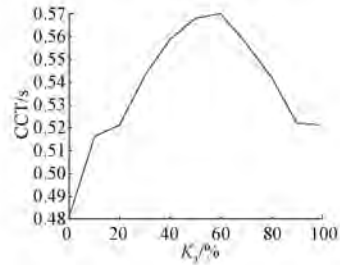


图 17 考虑故障位置 CCT 值

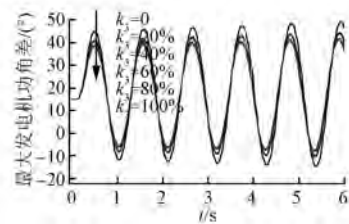


图 18 考虑故障位置功角摇摆曲线

由图 16~图 18 可以看出,理论分析结果为随着故障位置离等值同步机侧变远,极限切除角先增大后减小,含双馈风电的扩展双机系统的暂态功角稳定性先增强后减弱;仿真结果中,故障位置离等值同步机侧变远,系统的 CCT 随着故障位置的变化先增大后减小,功角差先减小后增大,系统的暂态功角稳定性先增强后减弱。可见仿真结果与理论分析一致。

2.4 负荷接入位置

考虑 K_4 变化对含双馈风机的扩展双机系统的极限切除角的影响,恒阻抗负荷接在母线 C 上,通过改变母线 A 与母线 C 之间的线路电抗值占母线 A 与母线 D 之间的线路电抗值的百分比来实现负荷接入位置的变化。图 2 所示系统中,风电比例 K_1 为 10%; 双馈风机在 A 母线处并网, 即 K_2 为零; 故障发生在线路 AB 末端, 即 K_3 为 100%。将各元件参数及 K_1 、 K_2 、 K_3 的值代入式 (23), 得到含双馈风机的扩展双机系统的极限切除角随负荷接入位置的变化趋势图, 如图 19 所示。

仿真计算得到 CCT 与 K_4 之间的变化关系如图 20 所示。负荷接入位置距离 A 母线长度占线路 AD 全长百分比分别为 0~100% 时得到的功角

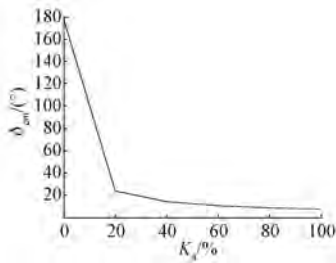


图 19 考虑负荷接入位置 δ_{cm} 变化趋势图

摇摆曲线如图 21 所示。

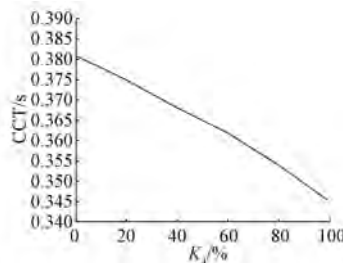


图 20 考虑负荷接入位置 CCT 值

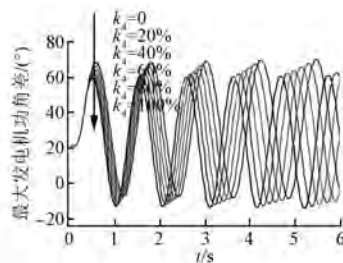


图 21 考虑负荷接入位置功角摇摆曲线

由图 19~图 21 可以看出,理论分析结果为随着负荷接入位置离等值同步机侧越远,极限切除角越小,越不利于含双馈风电的扩展双机系统的暂态功角稳定性;仿真结果中,负荷接入位置越远离等值同步机侧,系统的 CCT 随着负荷接入位置的变化而变化,功角越大,越不利于系统的暂态功角稳定性。可见仿真结果与理论分析一致。

3 结 语

在含双馈风机的扩展双机系统中,双馈风机采用等值阻抗模型,依据等面积法则推导出的系统极限切除角的变化规律和仿真结果均表明:

(1) 双馈风机直接接入系统时,随着风电比例的增加,含双馈风机的扩展双机系统的暂态功

角稳定性减弱。

(2) 双馈风机等容量替换同步机有功出力时,随着风电比例的增加,更有利于提高含双馈风机的扩展双机系统的暂态功角稳定性。

(3) 风机并网位置离等值同步机侧越远,越不利于系统的暂态功角稳定性。

(4) 随着故障位置距离等值同步机侧的距离逐渐增大,系统的暂态稳定性先增强后减弱。

(5) 负荷接入位置离等值同步机侧越远,越不利于系统的暂态功角稳定性。

【参 考 文 献】

[1] 刘斯伟.并网双馈风电机组对电力系统暂态稳定性的影响机理研究[D].北京:华北电力大学,2016.

[2] 李慧,范新桥,范梦杨.改进的双 PWM 型直驱永磁风电机组并网控制策略[J].电机与控制应用,2018,45(8): 98.

[3] 赵昂,张新燕,尹勋,等.电压跌落至不同程度时双馈风力发电机内部电磁场分析[J].电机与控制应用,2017,44(6): 109.

[4] 乔嘉赓,鲁宗相,闵勇,等.风电场并网的新型实用等效方法[J].电工技术学报,2009,24(4): 209.

[5] 黄弘扬,王波,黄晓明,等.基于双馈风电机组的分布式动态无功支撑系统[J].电力系统保护与控制,2016,44(24): 140.

[6] 孙建锋,焦连伟,吴俊玲,等.风电场发电机动态等值问题的研究[J].电网技术,2004,28(7): 58.

[7] 吕勇,雷涛,黄国华,等.并网双馈风力机感应发电机效应研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(24): 154.

[8] 陆畅,武振宁,胡军台,等.基于定子电压定向的自适应控制在电网故障下双馈异步发电机的优化运行策略[J].电机与控制应用,2017,44(4): 93.

[9] 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.

[10] 芦亮.风电并网对电力系统暂态稳定的影响[D].武汉:华中科技大学,2014.

[11] 杨琦,张建华,李卫国.电力系统接入风电场后的暂态稳定分析[J].高压技术,2009,35(8): 2042.

[12] 田新首,王伟胜,迟永宁,等.双馈风电机组故障行为及对电力系统暂态稳定性的影响[J].电力系统自动化,2015,39(10): 16.

[13] 赵会龙.含风电电力系统的暂态稳定分析[D].北京:华北电力大学,2014.

[14] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105.

[15] 汪洋子, 陈艳波, 马进. 基于扩展等面积准则的电力系统快速稳定判据[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 224.

[16] 姜惠兰, 吴玉璋, 周照清, 等. 含双馈风力发电场的多机系统暂态功角稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 999.

[17] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832.

[18] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043.

[19] 罗煦之, 易俊, 张健, 等. 结合 DFIG 功率特性研究风电并网对系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3401.

[20] 王清, 薛安成, 郑元杰, 等. 双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 875.

[21] 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.

[22] 徐玉琴, 刘丹丹. 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 108.

收稿日期: 2019-04-23

附录 A

极限切除角的详细表达式:

$$\delta_{cm} = \frac{\{\arccos[(\alpha + \beta + \gamma)\mu] 1\ 007\ 958\ 012\ 753\ 983\}}{17\ 592\ 186\ 044\ 416}$$

其中: $\alpha = \frac{\pi \left\{ -\pi + \arcsin \left(\frac{X_{dT} D_1 \frac{i}{2}}{X_L (K_4 i - i) B_1} \right) + \arctan \left\{ \frac{F_1 \frac{i}{4}}{X_L X_{T3} r_w (K_4 i - i) \left[\frac{Q F_1 \frac{i}{4}}{X_L X_{T3} r_w (K_4 i - i)} - 1 \right]} \right\}}{180} \right\}}{A_1}$;

$$\beta = \frac{A_1}{X_{dT} \sqrt{\left[\frac{G_1^2}{16 X_L^2 X_{T3}^2 r_w^2 \left(\frac{Q i G_1}{4 X_L X_{T3} r_w (i - i K_4)} \right)^2 C_1} \right] E_1}}$$

$$\gamma = \frac{X_L (K_4 i - i) B_1 \sqrt{\left[\frac{X_{dT}^2 D_1^2}{X_L^2 C_1 (X_{T3} X_{dT} r_w - X_{T3} X_{dT} X_w i)^2} + 1 \right] (2i)}}{X_{dT} D_1}$$

$$\mu = \frac{A_1}{X_{dT} E_1} + \frac{X_L (K_4 i - i) B_1 (-2i)}{X_{dT} D_1}$$

$$A_1 = X_L (K_4 i - i) (X_{T3} X_{dT} X_w K_2 K_3 - X_{T3} X_{dT} K_2 K_3 r_w) \quad (6i)$$

$$B_1 = X_{T3} X_{dT} X_w i - X_{T3} X_{dT} r_w; \quad C_1 = (i - i K_4)^2; \quad D_1 = P_{22} + Q_{22} + R_2;$$

$$E_1 = H_2 + i_2 + J_2 + K_2 + L_2 + M_2 + N_2 + O_2;$$

$$F_1 = M_1 + X_L^2 X_{T3} r_w (-4i) + X_L^2 X_{dT} r_w (-4i) + P_{11} - C_2 - V_1 + N_1 + X_L^2 X_{T3} K_4 r_w (4i) + X_L^2 X_{dT} K_2 r_w (4i) + X_L^2 X_{dT} K_4 r_w (4i) + R_1 + Y_1 + S_1 + L_1 + X_L X_{T2} X_{T3} r_w (-4i) + X_L X_{T2} X_{dT} r_w (-4i) + X_L X_{T3} X_{dT} r_w (-8i) + Q_{11} - T_1 - G_2 + X_{T2} X_{T3} X_{dT} r_w (-4i) + X_L X_{T2} X_{T3} K_4 r_w (2i) - A_2 + F_2 + E_2 + X_L X_{T2} X_{dT} K_4 r_w (2i) + X_L X_{T3} X_{dT} K_4 r_w (8i) +$$

$$\begin{aligned}
 & Z_1 + O_1 + U_1 + X_L^2 X_{dT} K_2 K_4 r_w (-4i) + X_1 - D_2 + W_1 + B_2; \\
 G_1 = & Y_1 - V_1 - 4X_L^2 X_{T3} i r_w - 4X_L^2 X_{dT} i r_w - 2X_L^3 i K_2 r_w - C_2 + 2X_L^2 i K_2^2 r_w - T_1 + X_L^2 X_{T2} i K_2^2 r_w - \\
 & 2X_L^3 i K_2^2 K_4 r_w - G_2 - 4X_L X_{T2} X_{T3} i r_w - 4X_L X_{T2} X_{dT} i r_w - 8X_L X_{T3} X_{dT} i r_w - 4X_{T2} X_{T3} X_{dT} i r_w - \\
 & A_2 + F_2 + E_2 + Z_1 - 2X_L^2 X_{T2} i K_2 r_w + 4X_L^2 X_{T3} i K_4 r_w + 4X_L^2 X_{dT} i K_2 r_w + 4X_L^2 X_{dT} i K_4 r_w + \\
 & 2X_L^3 i K_2 K_4 r_w + U_1 + X_1 - D_2 + X_L^2 X_{T2} i K_2 K_4 r_w - 4X_L^2 X_{dT} i K_2 K_4 r_w + W_1 + B_2 + \\
 & 2X_L X_{T2} X_{T3} i K_4 r_w + 2X_L X_{T2} X_{dT} i K_2 r_w + 2X_L X_{T2} X_{dT} i K_4 r_w + 8X_L X_{T3} X_{dT} i K_4 r_w; \\
 H_1 = & X_L^2 X_{dT} K_2 K_4 r_w (-2i); \quad I_1 = 2X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_4; \quad J_1 = 2X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2; \\
 & K_1 = X_L^2 X_{dT} K_2 r_w (2i); \quad L_1 = X_L^3 K_2^2 K_4 r_w (-2i); \quad M_1 = X_L^3 K_2^2 r_w (2i); \\
 N_1 = & X_L^2 X_{T2} K_2 r_w (-2i); \quad O_1 = X_L^2 X_{T2} K_2 K_4 r_w i; \quad P_{11} = X_L^3 K_2 r_w (-2i); \\
 Q_{11} = & X_L X_{T2} X_{dT} K_2 r_w (2i); \quad R_1 = X_L^3 K_2 K_4 r_w (2i); \quad S_1 = X_L^2 X_{T2} K_2^2 r_w i; \\
 T_1 = & 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2^2 K_4; \quad U_1 = X_L^2 X_{T2} X_{T3} K_1 K_2^2; \quad V_1 = 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2; \\
 W_1 = & 2X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2; \quad X_1 = X_L^2 X_{T2} X_{T3} K_1 K_2 K_4; \quad Y_1 = 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2^2; \\
 Z_1 = & 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2 K_4; \quad A_2 = 2X_L^2 X_{T2} X_{T3} K_1 K_2; \quad B_2 = 2X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_4; \\
 C_2 = & 4X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1; \quad D_2 = 4X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_4; \quad E_2 = 4X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_4; \\
 & F_2 = 4X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2; \quad G_2 = 4X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1; \\
 H_2 = & X_L^2 X_{dT} X_w K_2 (-2i) + K_1 + X_L^2 X_{dT} X_w K_2^2 (2i) + X_L^3 X_w K_2^2 K_3 (2i) + X_L^3 X_w K_2^3 K_3 (-2i) + \\
 & X_L^2 X_{dT} K_2^2 r_w (-2i) + X_L^3 K_2^2 K_3 r_w (-2i) + X_L^3 K_2^3 K_3 r_w (2i) + X_L X_{T3} X_{dT} X_w (-4i) + \\
 & X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w (-4i) + X_L X_{T3} X_{dT} r_w (4i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} r_w (4i) - 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2^2 K_3 + \\
 & 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2^3 K_3; \\
 I_2 = & X_L^3 X_w K_2^2 K_3 K_4 (-2i) + X_L^3 X_w K_2^3 K_3 K_4 (2i) + X_L^2 X_{T2} K_2^2 K_3 r_w (-2i) + X_L^2 X_{T2} K_2^3 K_3 r_w i + \\
 & X_L^2 X_{dT} K_2^2 K_3 r_w (6i) + X_L^2 X_{dT} K_2^2 K_4 r_w (2i) + X_L^3 K_2^2 K_3 K_4 r_w (2i) + X_L^3 K_2^3 K_3 K_4 r_w (-2i) + \\
 & X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2 (-2i) + X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_3 (-6i) + X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_4 (4i) + \\
 & X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w K_3 (-6i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w K_4 (2i) + Q_{11}; \\
 J_2 = & X_L X_{T3} X_{dT} K_3 r_w (6i) + X_L X_{T3} X_{dT} K_4 r_w (-4i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_3 r_w (6i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_4 r_w (-2i) + \\
 & X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2^2 i + J_1 + X_L^2 X_{T3} X_w K_2 K_3 (4i) + X_L^2 X_{dT} X_w K_2 K_3 (6i) + X_L^2 X_{dT} X_w K_2 K_4 (2i) + \\
 & X_L X_{T2} X_{dT} K_2^2 r_w (-i) + X_L^2 X_{T3} K_2 K_3 r_w (-4i) + X_L^2 X_{dT} K_2 K_3 r_w (-6i) + H_1 - 2X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2; \\
 K_2 = & X_L^2 X_{T2} X_w K_2^2 K_3 (2i) + X_L^2 X_{T2} X_w K_2^3 K_3 (-i) + X_L^2 X_{dT} X_w K_2^2 K_3 (-6i) + \\
 & X_L^2 X_{dT} X_w K_2^2 K_4 (-2i) - 6X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_3 - i_1 + X_L^2 X_{T3} X_w K_2 K_3 K_4 (-4i) + \\
 & X_L^2 X_{dT} X_w K_2 K_3 K_4 (-6i) + X_L X_{T2} X_{dT} K_2^2 K_3 r_w (3i) + X_L^2 X_{T3} K_2 K_3 K_4 r_w (4i) + \\
 & X_L^2 X_{dT} K_2 K_3 K_4 r_w (6i) - 2X_L^2 X_{T2} X_{T3} K_1 K_2^2 K_3 + X_L^2 X_{T2} X_{T3} K_1 K_2^3 K_3; \\
 R_2 = & X_L X_{T2} X_{dT} K_4 r_w i + X_L X_{T3} X_{dT} r_w (4i) - A_2 + J_1 + O_1 + 2X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_4 + \\
 & X_L^2 X_{T2} X_w K_2 K_4 + Z_1 + X_1 - i_1 + 2X_L^2 X_{T3} X_w K_2 K_4 - 2X_L^2 X_{dT} X_w K_2 K_4 + \\
 & X_L^2 X_{T3} K_2 K_4 r_w (2i) + X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 + X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_4 + H_1 + U_1; \\
 L_2 = & 6X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2 K_3 + 2X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2 K_4 + X_L^2 X_{T2} X_w K_2^2 K_3 K_4 (-i) + \\
 & X_L^2 X_{dT} X_w K_2^2 K_3 K_4 (6i) + 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2^2 K_3 K_4 - 2X_L^3 X_{T3} K_1 K_2^3 K_3 K_4 + W_1 + \\
 & X_L^2 X_{T2} K_2^2 K_3 K_4 r_w i + X_L^2 X_{dT} K_2^2 K_3 K_4 r_w (-6i) + X_L X_{T2} X_{T3} X_w K_2 K_3 (4i) + \\
 & X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2 K_3 (6i) + X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2 K_4 i + X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_2 K_3 (18i);
 \end{aligned}$$

(下转第 110 页)

$$\begin{aligned}
l_{\alpha 8} &= \frac{2 \cos 2\alpha + 1}{2 \cos \alpha + 1} [k_1 \cos(2\alpha - \alpha_1) + 2] + \cos 2\alpha + k_1 \cos(\alpha + \alpha_1) - \cos \alpha (2 \cos 2\alpha + 1 + 2k_1 k_2); \\
l_{\alpha 9} &= \frac{2 \cos 2\alpha + 1}{2 \cos \alpha + 1} [k_1 \cos(2\alpha - \alpha_1) + 2] + \cos 2\alpha + k_1 \cos(5\alpha - \alpha_1) - \cos \alpha (2 \cos 2\alpha + 1 + 2 \cos 4\alpha); \\
L_M &= l_{\alpha 10} L_{ms} + l_{\alpha 11} L_{\sigma r}; \\
l_{\alpha 10} &= \frac{2 \cos 2\alpha + 1}{2 \cos \alpha + 1} (4 \cos \alpha + 2 \cos 2\alpha + 3) + 2(\cos \alpha - \cos 2\alpha) \left(\frac{n-4}{2} - \cos 2\alpha \right) - (2 \cos 2\alpha + 1)^2; \\
l_{\alpha 11} &= 3 \times \frac{2 \cos 2\alpha + 1}{2 \cos \alpha + 1} - 2 \cos 2\alpha - 1; \\
T_r &= \frac{1}{(n-2)/2 + \cos 2\alpha} \cdot \left[\frac{n-4}{2} + \frac{\cos 4\alpha}{\cos(4\alpha - 2\alpha_1)} + \cos 2\alpha \right]; \\
x &= 2[(\omega_1 - \omega_r)t - j\alpha].
\end{aligned}$$

(上接第 94 页)

$$\begin{aligned}
M_2 &= X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_3 K_4 (6i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w K_2 K_3 (9i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w K_3 K_4 (3i) + \\
&\quad X_L X_{T2} X_{T3} K_2 K_3 r_w (-4i) + X_L X_{T2} X_{dT} K_2 K_3 r_w (-6i) + X_L X_{T2} X_{dT} K_2 K_4 r_w (-i) + \\
&\quad X_L X_{T3} X_{dT} K_2 K_3 r_w (-18i) + X_L X_{T3} X_{dT} K_3 K_4 r_w (-6i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_2 K_3 r_w (-9i) + \\
&\quad X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_3 K_4 r_w (-3i) - X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2; \\
N_2 &= X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2^2 K_3 (-3i) - 6X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_3 - X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_4 + \\
&\quad X_L X_{T2} X_{T3} X_w K_2 K_3 K_4 (-2i) + X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2 K_3 K_4 (-3i) + \\
&\quad X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_2 K_3 K_4 (-18i) + X_L X_{T2} X_{T3} K_2 K_3 K_4 r_w (2i); \\
O_2 &= X_L X_{T2} X_{dT} K_2 K_3 K_4 r_w (3i) + X_L X_{T3} X_{dT} K_2 K_3 K_4 r_w (18i) + 3X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2 K_3 + \\
&\quad 6X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_3 K_4 + X_L^2 X_{T2} X_{T3} K_1 K_2^2 K_3 K_4 - 6X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 K_2^2 K_3 K_4 + \\
&\quad 3X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 K_2 K_3 K_4; \\
P_{22} &= 2X_L^3 X_w K_2^2 + M_1 - 2X_L^2 X_{T3} X_w - 2X_L^2 X_{dT} X_w - 2X_L^3 X_w K_2 + X_L^2 X_{T3} r_w (-2i) + \\
&\quad X_L^2 X_{dT} r_w (-2i) + P_{11} - 2X_L^2 X_{T3} X_{dT} K_1 + L_1 - 2X_L^2 X_{T2} X_w K_2 - 2X_L^2 X_{T3} X_w K_2 + \\
&\quad 2X_L^2 X_{T3} X_w K_4 + K_1 + N_1 + 2X_L^2 X_{dT} X_w K_2 + 2X_L^2 X_{dT} X_w K_4 - V_1 + 2X_L^3 X_w K_2 K_4 + S_1 + \\
&\quad X_L^2 X_{T3} K_2 r_w (-2i) + X_L^2 X_{T3} K_4 r_w (2i) - 2X_L X_{T2} X_{T3} X_w + X_L^2 X_{dT} K_4 r_w (2i) + \\
&\quad R_1 + X_L^2 X_{T2} X_w K_2^2 + Y_1 - 2X_L^3 X_w K_2^2 K_4; \\
Q_{22} &= -2X_L X_{T2} X_{dT} X_w - 4X_L X_{T3} X_{dT} X_w - 2X_{T2} X_{T3} X_{dT} X_w - T_1 + X_L X_{T2} X_{T3} r_w (-2i) + \\
&\quad X_L X_{T2} X_{dT} r_w (-2i) + X_L X_{T3} X_{dT} r_w (-4i) + X_{T2} X_{T3} X_{dT} r_w (-2i) - 2X_L X_{T2} X_{T3} X_{dT} K_1 - \\
&\quad X_L X_{T2} X_{T3} X_w K_2 + X_L X_{T2} X_{T3} X_w K_4 + X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_2 + X_L X_{T2} X_{dT} X_w K_4 + \\
&\quad 4X_L X_{T3} X_{dT} X_w K_4 + X_L X_{T2} X_{T3} K_2 r_w (-i) + X_L X_{T2} X_{T3} K_4 r_w i + X_L X_{T2} X_{dT} K_2 r_w i.
\end{aligned}$$