

DOI: 10.7667/PSPC181311

基于聚合短路比的大型风场次同步振荡风险初筛

毕天姝, 李景一

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 大型风场数量众多, 逐一针对各风场进行精细化建模与次同步振荡风险分析, 面临风场建模、参数获取及所需时间较长的问题。采用计算并网系统短路比的方法确定系统强度, 用来对风场次同步振荡风险进行评估。基于常规短路比公式分析表明, 该方法仅能考虑并网点处系统短路容量及风场容量, 难以准确反应大型风场次同步振荡风险。由此, 提出了一种计及多风场因素的聚合短路比计算方法, 给出相应的计算公式。该计算方法能够反映风场网架情况、子风场交互作用以及控制系统对次同步振荡的影响。经过典型系统及实际系统算例分析, 聚合短路比计算方法能够正确计算不同控制系统下风场次同步振荡风险, 能够对具有不同拓扑结构的四个实际风场进行次同步振荡风险排序, 验证了所提方法应用于风场次同步振荡风险初筛的可行性。

关键词: 大型风场; 网架结构; 次同步振荡; 风险初筛; 聚合短路比

Risk screening of SSO induced in large-scale wind farms based on aggregated short circuit ratio

BI Tianshu, LI Jingyi

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: There are so many large-scale wind farms, that detailed modeling and SSO risk analysis for each wind farm one by one will face the difficulty of wind farm modeling, parameter acquisition and longer time spending. The system strength is determined by calculating the Short-Circuit Ratio (SCR) of grid-connected system, which is used to evaluate the SSO risk of wind farm. Analysis based on conventional SCR formula shows that the method can only consider the short-circuit capacity and wind farm capacity at the grid-connected point, and it is difficult to accurately reflect the SSO risk of large-scale wind farm. A calculation method of Aggregate Short-Circuit Ratio (ASCR) is proposed, and the corresponding formula is given. The calculation method can reflect the influence of the factors on SSO, including the grid structure of wind farm, the interaction of sub-wind farms and the control system. Through analyzing the typical and practical system examples, the ASCR can correctly calculate the SSO risk of wind farm for different control systems, and rank the SSO risk of four actual wind farms with different topological structures, which verifies the effectiveness of the method on risk screening of wind farm SSO.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902004), National Natural Science Foundation of China (No. 51725702), "111" Project of China (No. B08013), and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 529926160002).

Key words: large-scale wind farm; grid structure; SSO; risk screening; ASCR

0 引言

近些年, 我国新疆、东北等地并网大型风场已

频繁出现次同步振荡问题, 严重威胁系统安全稳定运行^[1-2]。例如, 2015年7月1日新疆哈密山北地区永磁直驱风场出现的风电次同步振荡问题, 最终造成天中直流送端3台660 MW火电机组跳机及西北电网频率由50.05 Hz下降至49.91 Hz。然而, 大型风场数量众多^[3], 各风场次同步振荡风险存在差异, 部分高次同步振荡风险的风场对系统潜在威胁

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB0902004); 国家自然科学基金项目资助(51725702); 高等学校学科创新引智计划资助(B08013); 国家电网公司科技项目资助(529926160002)

大, 值得重点关注。逐一针对各大型风场进行精细化建模与风险分析, 必然要增加计算的复杂度以及所需时间^[4-5], 同时也面临着参数获取的难题^[6-7]。因此, 采用简单模型, 初步筛选出次同步振荡风险较高的风场具有重要意义。

由交流系统短路容量及并网设备容量计算得出的短路比及相关指标^[8-9], 能够反映风机及直流等电力电子设备并网交流系统的相对强度, 已被应用于弱交流系统下交直流相互作用引发的电压不稳定等问题的潜在风险评估。而随着直流的建设及发展, 多回直流往往落点于同一交流受端电网进而形成多馈入直流系统^[10-11], 由此直流多馈入系统的风险分析更值得关注^[12]。文献[13]针对多馈入直流系统, 以不同直流母线处电压扰动量的比值定义得到交互作用因子(MIIF), 以其作为加权因子提出多馈入有效短路比(MISCR), 文献[14]通过时域仿真计算得到MIIF, 并验证其在风险评估时的有效性。文献[15-16]针对典型多馈入直流系统, 推导得到MIIF解析表达式。文献[17]进一步基于MISCR指标, 针对实际的多馈入直流系统评估电压稳定风险。但是采用的MISCR仅计及了交流网络的情况, 没有计及控制系统的影响。

大型风场的次同步振荡问题与直流接入引起的电压稳定等问题机理不同, 与子风场规模、网架结构、控制系统等多因素密切相关。已有研究忽略大型风场内部的网架情况, 将所有风机并网于同一汇集线并等值为一聚合模型, 进而分析常规短路比及控制器参数对次同步振荡风险的影响^[18-19]。但常规短路比在实际大型风场系统次同步振荡风险分析的适用性有待分析。

文章分析阐明了常规短路比计算方法在大型风场次同步振荡风险评估中存在的缺陷, 进而提出了一种聚合短路比计算方法, 给出了其相应的计算公式, 阐明了该计算方法能够计及网架情况、风场交互作用以及控制系统对次同步振荡的影响, 指出了采用该方法能够更准确地对各风场次同步振荡风险进行排序, 并通过实际系统算例验证了该评估方法的有效性。

1 采用常规短路比进行次同步振荡风险评估的适用性分析

1.1 常规短路比的概述

以图1所示单风场并网系统为例, 风场并网节点B处短路比 SCR_B 的计算公式为

$$SCR_B = S_B / S_W \quad (1)$$

式中: 并网节点B处交流系统短路容量 $S_B = U_n^2 / Z_B$, U_n 为系统额定电压, $Z_B = Z_T + Z_l + Z_s$, Z_T 、 Z_l 及 Z_s 分别为变压器阻抗、线路阻抗及交流系统等效阻抗; 风场W容量 $S_W = nS_G$, n 及 S_G 分别为风机台数及单台风机容量。

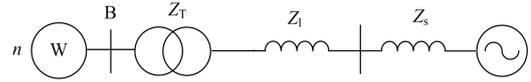


图1 单风场并网系统

Fig. 1 System with a single wind farm integrated

由式(1)可知, 交流系统强度减小及风机台数增多会造成系统相对强度减弱, SCR_B 降低, 系统次同步振荡风险升高^[20]。

1.2 常规短路比在多风场系统的适用性分析

短路比能够反映单风场并网系统的次同步振荡风险, 但大型风场由多个子风场构成, 且风场之间存在交互作用并共同影响系统的次同步振荡风险, 由此, 本节开展常规短路比在多风场系统次同步振荡风险评估的适用性分析。

大型风场中任意两个风场送出系统可以用图2(a)所示系统表示。图中风场并网节点 B_j 、 B_k 及汇集线 $B_{\Sigma jk}$ 处的常规短路比 SCR_{B_j} 、 SCR_{B_k} 及 $SCR_{B_{\Sigma jk}}$ 计算公式分别为

$$\begin{cases} SCR_{B_j} = S_{B_j} / S_{W_j} \\ SCR_{B_k} = S_{B_k} / S_{W_k} \\ SCR_{B_{\Sigma jk}} = S_{B_{\Sigma jk}} / (S_{W_j} + S_{W_k}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, 并网节点 B_j 、 B_k 及汇集线 $B_{\Sigma jk}$ 处的交流系统短路容量: $S_{B_j} = U_n^2 / Z_{B_j}$, $S_{B_k} = U_n^2 / Z_{B_k}$, $S_{B_{\Sigma jk}} = U_n^2 / Z_{\Sigma jk}$ 。考虑到短路电流计算时, 风场提供的短路电流远小于系统侧提供的短路电流, 可知 $Z_{B_j} = Z_j + Z_{\Sigma jk}$, $Z_{B_k} = Z_k + Z_{\Sigma jk}$, Z_j 、 Z_k 分别为风场并网节点 B_j 、 B_k 至汇集线 $B_{\Sigma jk}$ 的阻抗, $Z_{\Sigma jk}$ 为汇集线至无穷大系统之间的阻抗。风场 j 、 k 的容量为 $S_{W_j} = n_j S_G$, $S_{W_k} = n_k S_G$ 。

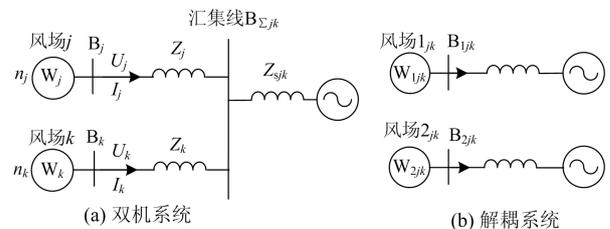


图2 双风场并网系统及其解耦系统

Fig. 2 System with two wind farms integrated

and its decoupling system

为了分析常规短路比在多风场系统的适用性,将双风场系统解耦为与原系统等价的两个单风场并网系统(解耦过程见附录 A 中 1)节),进而求得解耦后单风场系统的短路比,并将其与常规短路比进行对比分析。通过分析,上述双风场系统可以解耦为图 2(b)所示两个单风场并网系统,两个解耦系统中风场并网点 B_{1jk} 及 B_{2jk} 处短路比分别为 SCR_{1jk} 及 SCR_{2jk} ,且 SCR_{1jk} 恒小于 SCR_{2jk} (SCR_{1jk} 与 SCR_{2jk} 数值关系的分析过程见附录 A 中 2)节)。进而系统次同步振荡风险由数值更小的 SCR_{1jk} 决定,其表达式为

$$SCR_{1jk} = 1 / [(\frac{n_j S_G}{S_{Bj}} + \frac{n_k S_G}{S_{Bk}})(0.5 + 0.5m)] \quad (3)$$

式中: $m = \sqrt{1 - (1 - g^2)4 \frac{n_j n_k}{S_{Bj} S_{Bk}} / [\frac{n_j}{S_{Bj}} + \frac{n_k}{S_{Bk}}]^2}$; $n_{j,k}$ 、 $S_{Bj,k}$ 分别为风场 j 、 k 风机台数及母线 $B_{j,k}$ 处短路容量; g 为与短路容量相关的参数, $g = \sqrt{S_{Bj} S_{Bk} / (S_{B\Sigma jk})^2}$ 。

由式(3)可知,系统的次同步振荡风险与各子风场的风机台数 $n_{j,k}$ 以及各子风场并网点 $B_{j,k}$ 处短路容量 $S_{Bj,k}$ 密切相关。但式(2)中风场 j 并网点 B_j 处的常规短路比 SCR_{Bj} , 仅计及自身的网架情况 Z_j 及风机台数 n_j ; 母线 $B_{\Sigma jk}$ 处的常规短路比,计及了两个风场的风机台数($n_j + n_k$),但是无法计及风场并网点至汇集线的网架情况($Z_{j,k}$)。由此可知,常规短路比计及的因素并不全面,难以准确评估多风场系统次同步振荡风险。

2 基于聚合短路比的次同步振荡风险分析

2.1 聚合短路比

考虑到常规短路比在大型风场次同步振荡风险评估时的不足,以图 3 所示典型的大型风场并网系统为例,给出聚合短路比计算公式。图中 $W_i (i=1,2,\dots,7)$ 为子风场,其并网风机台数为 n_i 台,并网点为母线 B_i ,经变压器 T_i 升压至 220 kV 后汇集于总汇集线 B_Σ ,集中外送。

针对大型风场给出的计算公式要能够较全面计及网架情况、子风场风机台数以及机侧变流控制系统的影响,初步反映上述因素对大型风场次同步振荡风险的影响;同时作为一种应用于次同步振荡风险初筛的计算方法,公式具有形式简单、便于理解、应用及计算的特点。考虑上述两个因素,提出的聚合短路比 (Aggregated Short Circuit Ratio, ASCR) 如式(4)所示。

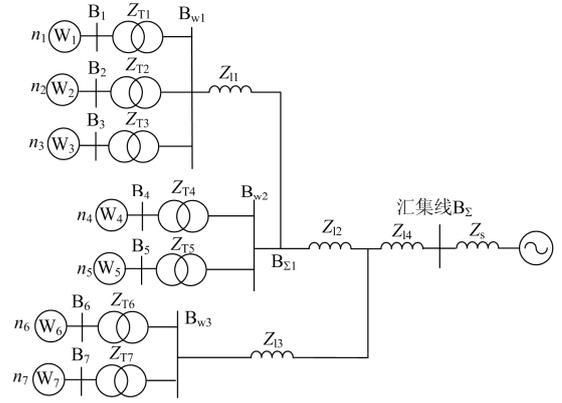


图 3 大型风场并网系统

Fig. 3 System with large-scale wind farm integrated

$$ASCR = GASCR / MASCR \quad (4)$$

式中: $GASCR$ 为网络侧聚合短路比 (Grid-side ASCR), 主要体现交流网络影响; $MASCR$ 为机侧聚合短路比 (Machine-side ASCR), 主要体现变流控制系统影响。 $GASCR$ 及 $MASCR$ 的表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} GASCR = S_{B_B\Sigma} / S_{w_B\Sigma} \\ S_{B_B\Sigma} = (n_1 / \sum_{i=1}^k n_i) S_{B1} + (n_2 / \sum_{i=1}^k n_i) S_{B2} + \\ \quad \dots + (n_k / \sum_{i=1}^k n_i) S_{Bk} \\ S_{w_B\Sigma} = (n_1 + n_2 + \dots + n_k) S_G \\ MASCR = (n_1 / \sum_{i=1}^k n_i) CSCR_1 + (n_2 / \sum_{i=1}^k n_i) CSCR_2 + \\ \quad \dots + (n_k / \sum_{i=1}^k n_i) CSCR_k \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: $S_{B_B\Sigma}$ 及 $S_{w_B\Sigma}$ 分别为聚合短路容量及风场容量; k 为子风场数量; n_i 为第 i 个子风场的风机台数; S_{Bi} 为第 i 个风场并网点处的短路容量; $CSCR_i$ 为第 i 个风场风机单独并网出现次同步振荡时的临界短路比。根据现有风电并网规定,风机并网运行前,需要提供相应的电气模型给专门的单位进行并网检测,可以基于该电气模型,测试得到风机出现次同步振荡时的临界 SCR , 即 $CSCR_i$ 参数。

由式(4)及式(5)可知,聚合短路比计及各子风场风机台数 n_i 及短路容量 S_{Bi} , 体现各子风场风机台数及短路容量与次同步振荡相关; 系数 $(n_i / \sum_{i=1}^k n_i)$ 体现了各子风场规模的影响,若某一风场风机台数为 0, 则其并网点处短路容量及控制器决定的临界短路比不会计入到聚合短路比公式中,表明该风场对系统无影响,若该风场并网风机台数不断增大,近似增

加到无穷大, 则该风场权重系数近似为 1, 其余风场的权重系数近似为 0, 该风场近似决定整个系统的特性; 风机采用不同的控制系统, 其出现次同步振荡时的 $CSCR_i$ 存在差异, 而 S_{Bi} 含有子风场并网点至无穷大系统之间的阻抗和, 上述两个变量分别体现了控制系统及风场并网点处网架强度与次同步振荡的关系。

2.2 短路比作用分析

2.2.1 网架情况变化

网架强度变化会造成风场并网点处短路容量变化, 为了分析短路容量变化对聚合短路比的影响, 将 $GASCR$ 对 S_{Bi} 求偏导数, 得

$$\frac{\partial GASCR}{\partial S_{Bi}} = \frac{n_i}{(n_1 + n_2 + \dots + n_k)^2 S_G} \quad (6)$$

式中: $\frac{\partial GASCR}{\partial S_{Bi}} > 0$, 即随着第 i 个风场的短路容量增大, $GASCR$ 增大, $ASCR$ 增大, 反应系统次同步振荡风险减小。

2.2.2 子风场风机台数变化

为了分析子风场风机台数对聚合短路比的影响, 将 $GASCR$ 对 n_i 求偏导数:

$$\frac{\partial GASCR}{\partial n_i} = [n_1(S_{Bi} - 2S_{B1}) + n_2(S_{Bi} - 2S_{B2}) + \dots + n_k(S_{Bi} - 2S_{Bk})] / [(n_1 + n_2 + \dots + n_k)^2 S_G] \quad (7)$$

由于实际系统中两个风场的短路容量不会相差两倍以上, 因此 $S_{Bi} - 2S_{Bj} < 0$, $\frac{\partial GASCR}{\partial n_i} < 0$ 。即随着风机台数的增加, $GASCR$ 减小, 反应系统次同步振荡风险增大。

2.2.3 机侧控制系统影响

通过对某一风场风机变流控制系统进行优化, 能够有效地降低系统的次同步振荡风险。对于参数经过优化的风机, 其并网时出现风电次同步振荡的临界短路比 $CSCR_i$ 会下降, 进而根据式(4)及式(5)所示的聚合短路比计算公式, 可知 $MASCR$ 下降, $ASCR$ 上升。即 $ASCR$ 指标能够体现控制器参数变化对次同步振荡特性的影响。

3 算例分析

3.1 典型系统算例

基于图 2 所示典型系统, 验证机侧变流控制系统对次同步振荡特性的影响规律, 以及聚合短路比 ($ASCR$) 对这一影响规律的反应情况。

在 PSCAD 仿真软件中, 搭建典型系统的时域

仿真模型。系统的网架参数见附录 B, 计算得到其 $GASCR$ 为 0.79。各风场风机的控制系统中 d/q 轴内环比例系数分别整定为 (0.7,0.4)、(0.4,0.4) 以及 (0.2,0.2), 分别记为参数组合 AI、AII 及 AIII。AI 组参数对应的控制器带宽最大, 能够快速实现控制目标, 但是对噪声的抑制效果最差, 适用于动态响应特性要求高的场合。AIII 组参数带宽最低, 其响应特性最慢, 抑制噪声的能力最强。而 AII 组参数的响应特性及噪声抑制能力介于两者之间。三组不同控制器参数下的 $CSCR$ 的值分别为 0.675、0.888 以及 1.549。最后计算得到聚合短路比分别为 1.17、0.89 及 0.51。由于网架参数未发生变化, 普通短路比数值不变。

时域仿真结果如图 4 所示, 在 2.5 s 时, 控制器参数组合由 AI 切换为 AII, 通过 FFT 分析可知 2.5~3.5 s 系统出现了约 14 Hz 的有功功率振荡, 振荡的幅值为 0.2 MW。在 3.5 s 时, 控制器参数切换为 AIII, 次同步振荡的频率变化为 15 Hz 左右, 振荡的幅值进一步升高至 1.4 MW, 次同步振荡风险升高。不同控制器参数组合下系统次同步振荡风险与聚合短路比的分析结果一致。即聚合短路比能够反应控制系统参数变化对次同步振荡稳定性的影响, 但普通短路比无法反映这一影响。

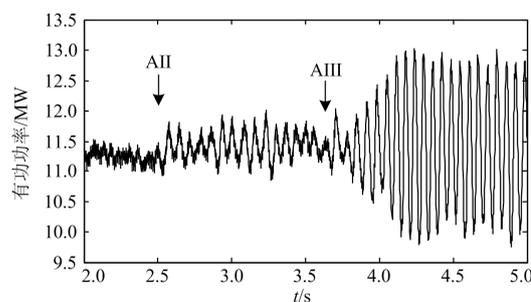


图 4 所有风场控制器参数变化对次同步振荡的影响

Fig. 4 Effect of controller parameters on SSO

3.2 实际系统算例

进一步以 4 个实际系统算例验证不同网架结构下系统次同步振荡风险以及聚合短路比对影响规律的反映情况。4 个实际大型风场的网架结构如图 5 所示, A 风场拓扑结构为辐射状; B 风场中各子风场汇集于同一母线后集中外送; C 风场及 D 风场的网架结构为混联拓扑结构, 为风场的典型拓扑结构, 各风场风机台数已在图中标注。

4 个风场的聚合短路比、汇集线(ST、LK、WD 及 YS)短路比以及子风场 W_1 并网点处短路比计算结果如表 1 所示。

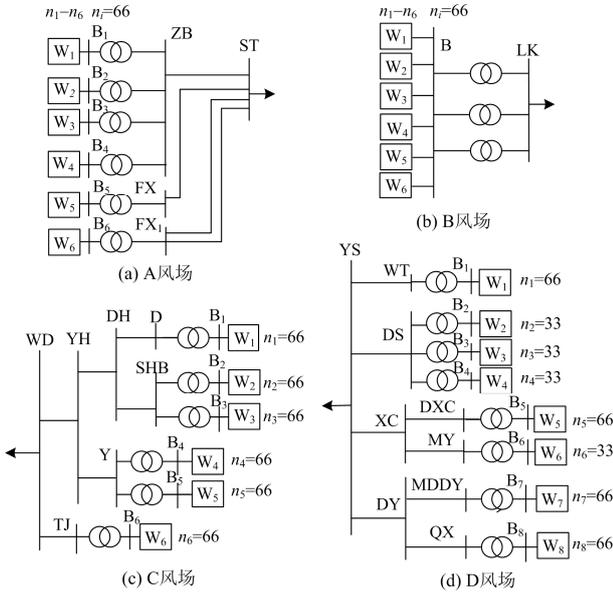


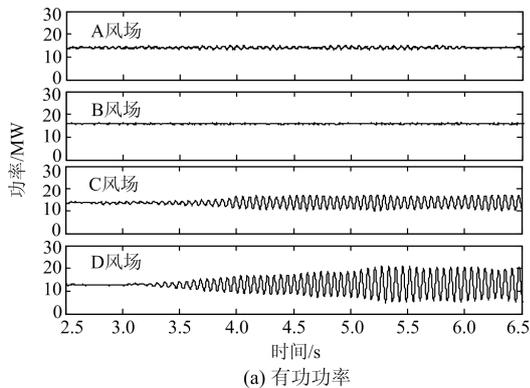
图 5 4 个实际风场网架拓扑结构
Fig. 5 Grid structure for four field wind farms

表 1 各风场短路比计算结果

Table 1 Calculation result of the SCR for four wind farms

风场	A	B	C	D
聚合短路比	1.49	4.5	1.13	1.05
汇集线短路比	18.8	5.04	7.68	2.4
W ₁ 并网点短路比	5.74	3	4.19	4.44

4 个风场采用相同的控制系统，同步调节各风场的控制器参数，风场振荡时的有功功率波形及频谱分析结果如图 6 所示。仿真计算时，D 风场首先发生了振荡，振荡幅值 6.6 MW；C 风场随后发生振荡，振荡幅值 4.2 MW；A 风场最后出现振荡，振荡幅值为 0.49 MW；而 B 风场始终没有发生振荡。根据风场出现次同步振荡的顺序及振荡的幅值，仿真计算得到各风场的风电次同步振荡风险为 D>C>A>B。仿真计算结果与聚合短路比计算结果一致，验证了聚合短路比指标在风电次同步振荡风险分析时的效果。



(a) 有功功率

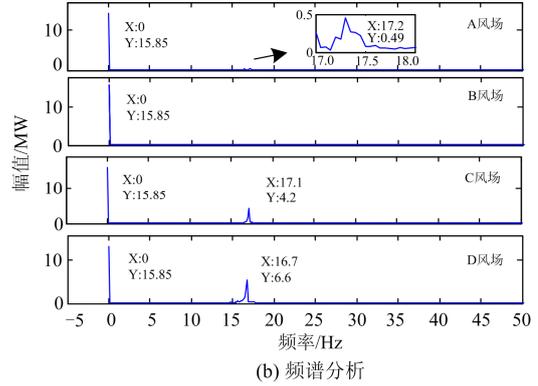


图 6 各风场汇集线有功功率及频谱分析结果

Fig. 6 Active power at collection bus of different wind farms and its FFT result

4 结论

本文提出聚合短路比用于大型风场次同步振荡风险初筛，得到如下结论：1) 大型风场内子风场并网点及汇集线处的两种常规短路比，难以同时计及网架结构及子风场之间的交互作用，难以准确评估风场次同步振荡风险；2) 提出了一种计及网架情况、风机台数以及风机控制系统影响的聚合短路比，随着网架强度变强、子风场风机台数减少以及控制器参数优化，聚合短路比数值增大，能够反应次同步振荡风险变化趋势；3) 实际系统算例验证了聚合短路比指标能够正确评估 4 个具有不同网架结构的大型风场的次同步振荡风险。

附录 A 双风场系统解耦及解耦后短路比对比分析

1) 解耦过程分析

对于图 2(a)所示的双风场并网系统，给出其解耦过程。图 2(a)所示双风场系统中，各电感元件的动态方程为

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL & -\omega_0 L \\ \omega_0 L & sL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (A1)$$

对各电感方程进行线性化并联立整理后，求得交流网络侧风场并网处电压关于电流的传递函数为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{jd} \\ \Delta U_{jq} \\ \Delta U_{kd} \\ \Delta U_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_0(L_j + L_{sjk})\mathbf{G} & \omega_0 L_{sjk}\mathbf{G} \\ \omega_0 L_{sjk}\mathbf{G} & \omega_0(L_j + L_{sjk})\mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{jd1} \\ \Delta I_{jq1} \\ \Delta I_{kd1} \\ \Delta I_{kq1} \end{bmatrix} \quad (A2)$$

式中， \mathbf{G} 的表达式为 $\begin{bmatrix} (s/\omega_0) & -1 \\ 1 & (s/\omega_0) \end{bmatrix}$ 。

考虑到直驱风机风电次同步振荡时, 系统的功率潮流水平较低, 因此近似地认为各风场端口处电压及相位一致, 进而各风场风机传递函数模型一致, 对于风机侧的网络传递函数为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{jd} \\ \Delta U_{jq} \\ \Delta U_{kd} \\ \Delta U_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_1} \mathbf{Z} \\ \\ \\ \frac{1}{n_2} \mathbf{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{jd1} \\ \Delta I_{jq1} \\ \Delta I_{kd1} \\ \Delta I_{kq1} \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

式中: $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11}(s) & Z_{12}(s) \\ Z_{21}(s) & Z_{22}(s) \end{bmatrix}$; $Z_{11}(s)$ 、 $Z_{12}(s)$ 、 $Z_{21}(s)$

及 $Z_{22}(s)$ 为单台永磁直驱风机在同步坐标系下端电压关于端电流的传递函数模型; n_1 及 n_2 分别为并网风机台数。

结合式(A2)和式(A3), 可知系统的闭环特征方程为^[21]

$$\det \left(\begin{bmatrix} \frac{1}{n_1} \mathbf{Z} \\ \\ \\ \frac{1}{n_2} \mathbf{Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_0(L_j + L_{sjk})\mathbf{G} & \omega_0 L_{sjk}\mathbf{G} \\ \omega_0 L_{sjk}\mathbf{G} & \omega_0(L_j + L_{sjk})\mathbf{G} \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (\text{A4})$$

进一步对该行列式做如下初等变换: 1) 第 1 行、第 2 行乘以 n_1 , 第 3 行、第 4 行乘以 n_2 ; 2) 第 2 行与第 3 行元素互换; 3) 第 2 列与第 3 列元素互换。经过变换后的表达式为

$$\det(\mathbf{M}) = 0 \quad (\text{A5})$$

其中:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} Z_{11}(s) & Z_{12}(s) & & \\ & Z_{11}(s) & Z_{12}(s) & \\ Z_{21}(s) & & Z_{22}(s) & \\ & Z_{21}(s) & & Z_{22}(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (s/\omega_0)\mathbf{Z}_G & -\mathbf{Z}_G \\ \mathbf{Z}_G & (s/\omega_0)\mathbf{Z}_G \end{bmatrix} \quad (\text{A6})$$

式中: \mathbf{Z}_G 为 $\begin{bmatrix} n_j \omega_0(L_j + L_{sjk}) & n_j \omega_0 L_{sjk} \\ n_k \omega_0 L_s & n_k \omega_0(L_k + L_{sjk}) \end{bmatrix}$, 为与

风机台数及网架情况相关的矩阵, 该矩阵为主对角元素占优矩阵, 为非奇异矩阵, 进而可知存在矩阵

\mathbf{P} , 使得 $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{Z}_G\mathbf{P} = \mathbf{J}$ ^[22]。 $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \\ & \lambda_2 \end{bmatrix}$, 为矩阵 \mathbf{Z}_G

的特征值矩阵。

进而记 $\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix}$, 对式(A5)进一步化简:

$$\det(\mathbf{M}) = \det(\mathbf{P}_1^{-1}\mathbf{M}\mathbf{P}_1) =$$

$$\det \left(\begin{bmatrix} Z_{11}(s) & & Z_{12}(s) \\ & Z_{11}(s) & Z_{12}(s) \\ Z_{21}(s) & & Z_{22}(s) \\ & Z_{21}(s) & Z_{22}(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (s/\omega_0)\mathbf{J} & -\mathbf{J} \\ \mathbf{J} & (s/\omega_0)\mathbf{J} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A7})$$

对换式(A7)矩阵中的第 2 行与第 3 行, 第 2 列与第 3 列, 则

$$\det(\mathbf{M}) = \det \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{11} & \\ & \mathbf{M}_{22} \end{pmatrix} = \det(\mathbf{M}_{11}) \times \det(\mathbf{M}_{22}) = 0 \quad (\text{A8})$$

式中: $\mathbf{M}_{11} = \mathbf{Z} + \lambda_1 \mathbf{G}$; $\mathbf{M}_{12} = \mathbf{Z} + \lambda_2 \mathbf{G}$ 。

由式(A8)可知, 原双机系统的特征方程, 通过一定的化简计算, 最终化简为两个特征方程矩阵相乘的形式。进一步针对单风场并网系统的特征方程进行分析, 对比解耦后的两个特征方程与单风场特征方程之间的关系。

对于图 1 所示单风场并网系统, 并网风机台数为 n , 变压器、线路及交流系统等效电感的和为 L_Σ , 汇集线 B 处短路比为 $\frac{U_n^2 / (\omega_0 L_\Sigma)}{n S_G}$ 。参阅式(A2)—式(A4), 可知单风场系统的闭环特征方程可以写成式(A9)所示。

$$\det(\mathbf{M}_1) = 0 \quad (\text{A9})$$

式中, $\mathbf{M}_1 = \frac{1}{n} \mathbf{Z} + \omega_0 L_\Sigma \mathbf{G}$ 。

对式(A9)进行行变换, 每一行均乘以 n , 进一步将短路比 SCR_B 表达式代入, 得

$$\det(\mathbf{M}_1) = \det(\mathbf{Z} + n\omega_0 L_\Sigma \mathbf{G}) = 0 \quad (\text{A10})$$

对比双风场解耦后的特征方程表达式(式(A8))与单风场的特征方程表达式(式(A10)), 可知双风场系统可以解耦为 2 个单风场系统。式(A8)中的 λ_1 及 λ_2 与式(A10)中的 $n\omega_0 L_\Sigma$ 相对应, 进而可知解耦子系

统的短路比分别为 $\frac{U_n^2}{S_G} \frac{1}{\lambda_1}$ 及 $\frac{U_n^2}{S_G} \frac{1}{\lambda_2}$ 。

2) 解耦后两个短路比之间的关系

对解耦后得到的两个短路比进行分析, 解耦后两个单风场系统 1_{jk} 及 2_{jk} 的短路比为

$$\begin{cases} SCR_{1_{jk}} = \frac{1}{S_G} 2 / [(\frac{n_j}{S_{Bj}} + \frac{n_k}{S_{Bk}}) + (\frac{n_j}{S_{Bj}} + \frac{n_k}{S_{Bk}})m] \\ SCR_{2_{jk}} = \frac{1}{S_G} 2 / [(\frac{n_j}{S_{Bj}} + \frac{n_k}{S_{Bk}}) - (\frac{n_j}{S_{Bj}} + \frac{n_k}{S_{Bk}})m] \end{cases} \quad (\text{A11})$$

式中： m 的表达式为 $\sqrt{1-(1-g^2) \cdot 4 \frac{n_j n_k}{S_{Bj} S_{Bk}} - [\frac{n_j}{S_{Bj}} + \frac{n_k}{S_{Bk}}]^2}$ ； $S_{Bj,k}$ 为原系统各风场并网端口处的短路容量； g 为与网架相关的参数，其表达式为 $\sqrt{S_{Bj} S_{Bk} / (S_{B\Sigma jk})^2}$ 。结合短路容量的计算公式(式(2)所示)，进一步进行分析可知 $g < 1$ ，且 $4 \frac{n_j n_k}{S_{Bj} S_{Bk}} < [\frac{n_j}{S_{Bj}} + \frac{n_k}{S_{Bk}}]^2$ ，因此有 $m < 1$ ，进而， SCR_{1jk} 恒小于 SCR_{2jk} 。

附录 B 典型系统网架参数

表 2 典型系统网架参数

Table 2 Grid parameters of typical system

风场	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇
风机台数	66	33	33	33	33	66	66
变压器	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
容量/MVA	120	63	63	63	63	120	120
漏抗/%	14	14	14	14	14	14	14
线路	L ₁₁	L ₁₂	L ₁₃	L ₁₄			
长度/km	22	22	16.6	49.7			
类型	LGJ-400						
系统等效 阻抗 Z _s /Ω	14(归算至 220 kV)						

参考文献

[1] 张超, 王维庆, 王海云, 等. 风火打捆外送系统 220 kV 电网次同步振荡监控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 138-144.
ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on monitoring and control strategy of subsynchronous oscillation for 220 kV power grid in wind-thermal-bundled transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 138-144.

[2] 刘革新, 白杨, 任祖怡, 等. 次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 131-136.
LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of subsynchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.

[3] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.

[4] 高海翔, 陈颖, 许寅. 双馈风机的电磁暂态平均化建

模和快速仿真[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 59-64.
GAO Haixiang, CHEN Ying, XU Yin. Averaged modeling and fast electromagnetic transient simulation for doubly-fed wind turbines[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 59-64.

[5] NOURELDEEN O, HAMDAN I. Design of robust intelligent protection technique for large-scale grid-connected wind farm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 17-29. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.

[6] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.

[7] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.

[8] IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: IEEE standard 1204—1997[S].

[9] SHAO Y, TANG Y. Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 646-653.

[10] 刘青, 廖诗武, 姚伟, 等. 计及并联电容器补偿的多馈入交直流系统改进有效短路比指标[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 7-15.
LIU Qing, LIAO Shiwu, YAO Wei, et al. An improved effective short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power system considering shunt capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 7-15.

[11] 杨燕, 林勇, 左郑敏, 等. 珠三角电网目标网架研究[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 62-69.
YANG Yan, LIN Yong, ZUO Zhengmin, et al. Research on target framework of pearl river delta power grids[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 62-69.

[12] 龙志, 杨柳, 姚文峰. 广东电网远景直流落点优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 145-150.
LONG Zhi, YANG Liu, YAO Wenfeng. Guangdong power grid DC placement optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 145-150.

[13] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris, France: CIGRE, 2008.

[14] 金小明, 周保荣, 管霖, 等. 多馈入直流交互影响强度的评估指标[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 98-102.

- JIN Xiaoming, ZHOU Baorong, GUAN Lin, et al. HVDC-interaction-strength index for the multi-infeed-HVDC power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 98-102.
- [15] 邵瑶, 汤涌. 多馈入直流系统交互作用因子的影响因素分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 794-799.
SHAO Yao, TANG Yong. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 794-799.
- [16] LEE D H A, ANDERSSON G. An equivalent single-infeed model of multi-infeed HVDC systems for voltage and power stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 303-312.
- [17] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [18] HUANG Y, YUAN X, HU J, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1193-1204.
- [19] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 84-91.
CHEN Feihong, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Sub-synchronous control interaction analysis in doubly-fed induction generator based on frequency scanning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 84-91.
- [20] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 开环模式谐振引发含变速风电机组电力系统振荡的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6481-6491.
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Oscillations caused by open-loop modal resonance in power system with variable-speed wind generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6481-6491.
- [21] CAO W, MA Y, YANG L, et al. D-Q impedance based stability analysis and parameter design of three-phase inverter-based AC power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 6017-6028.
- [22] 白方周. 多变量频域理论与设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.

收稿日期: 2018-10-21; 修回日期: 2018-11-24

作者简介:

毕天姝(1973—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、广域同步相量测量技术及其应用; E-mail: tsbi@ncepu.edu.cn

李景一(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为次同步振荡、电力系统保护与控制。E-mail: lly510647583@163.com

(编辑 许威)