

# 风电经分频输电并网系统穿透能力计算方法研究

李熠<sup>1</sup>, 滕予非<sup>2</sup>, 朱丽嫚<sup>3</sup>, 李小鹏<sup>2</sup>

- (1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
3. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 风电经分频输电并网是一种全新的风电并网方案。在对该系统结构及优点进行介绍的基础上, 提出了一种基于静态安全约束的穿越功率极限计算方法。该方法可以应用于常规风电并网系统以及风电经分频输电并网系统。最后, 在RTS24节点测试系统中对3种风电并网方案进行分析, 对其风电穿透能力进行了对比。分析结果表明, 与风电就近并入电网边界相比, 利用分频或者工频传输系统将风电传输至负荷中心可以数倍地提高风电的穿越功率极限的结论。由此可见, 分频输电系统为风电并网提供了一种全新的方案, 具有经济与技术优势, 在大型风电场中有着很好的应用前景。

**关键词:** 风电并网; 分频输电; 穿透率; 优化方法; 交交变频器

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)04-0050-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.011

## Research on Calculation Method of Penetration Limit of Wind Power Integrated via Fractional Frequency Transmission System

Li Yi<sup>1</sup>, Teng Yufei<sup>2</sup>, Zhu Liman<sup>3</sup>, Li Xiaopeng<sup>2</sup>

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Fractional frequency transmission system (FFTS) provides a new approach for integrating remote large-capacity wind power to grid. Firstly, the structure and advantages of this system are introduced. Then, an optimization method is proposed to determine the penetration limit of wind power by considering static security constraints. This method could be used for the system integrated wind system via FFTS and that via conventional transmission approach. Finally, three schemes are designed to integrate wind power to RTS-24 testing system, and the penetration limits of these schemes are compared. The results indicate that the penetration limits are increased obviously when the wind power is transmitted to load center instead of the border of the grid. Therefore, integrating wind farm to power grid via FFTS is a very promising approach to benefit wind power industry.

**Key words:** grid-connected wind farm; fractional frequency transmission system (FFTS); penetration limit; optimization method; cycloconverter

## 0 引言

并网型风电场是大规模利用风能的有效方式之一<sup>[1]</sup>, 因此并网运行的风力发电技术成为目前大规模发展风电需要研究的重点和难点, 其联网问题直接影响着风电产业的发展。目前风电联网的瓶颈主

要表现在两个方面: 一是效率和成本问题。降低成本、提高效率、增加寿命一直是风电机组发展所追求的目标, 一塔一发电机一变压器的结构以及多级行星齿轮变速箱的插入, 不但使效率降低, 而且增大了成本投入, 机组可靠性降低, 机组变得异常庞大笨重。二是风电机组并网以及风电机组与电网之间的相互影响问题。风电出力波动大, 而且风电场离负

荷中心较远 给电网运行带来不利影响<sup>[2-4]</sup>。毫无疑问,每千瓦成本高、系统抗风电扰动能力差是影响风电产业发展的关键性制约。所以,要想从根本上解决风电并网问题,则亟需探索新的技术道路和方案。

早在20世纪90年代,文献[5]就提出了分频输电的设想。它是通过降低输电系统频率,减小输电系统中的电抗,从而大幅度提高输电系统输送能力的一种新型输电方式。它突破了传统输电方式主要依靠提高电压等级来提高输送容量的局限,为远距离、大容量传输提供了一种有竞争力的输电方案。而分频输电系统动模实验则证明了将频率降至工频的1/3可以数倍地(2.6倍)提高输电线路的传输容量<sup>[6-7]</sup>。近几年来,部分学者也通过仿真的方式对分频输电的稳态特定及故障特性进行了详细的研究<sup>[8-9]</sup>。研究表明,分频输电方式在新能源和可再生能源发电远距离接入系统中也有着广阔的应用前景<sup>[10-11]</sup>,同时也对其控制策略进行了初步的探索<sup>[12]</sup>。

然而,以上研究都没有对风电经分频输电并网系统的技术经济性能进行定量的分析。因此,下面对风电经分频输电并网系统的技术经济性能进行了分析。利用基于静态安全约束的风电经分频输电方式并网系统的穿越功率极限计算方法,在RTS24节点测试系统中对3种风电并网方案进行分析。经过比较得知与风电就近并入电网边界相比,利用分频或者工频传输系统将风电传输至负荷中心可以数倍地提高风电地穿越功率极限。

## 1 风电经分频输电并网系统

### 1.1 系统示意图

分频输电用于风电并网的结构如图1所示。其基本思路为:在同一个风力场,通过控制系统使各发电机发出相同频率,共同汇入交流汇流母线,经过升压变压器及输电线路传输后,通过分频输电装置—变频器并入无穷大系统。

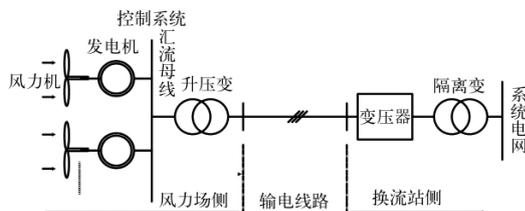


图1 风电经分频输电并网的结构  
风电经分频输电并入电网,可以预期存在着以

下优势:

- 1) 采用较低频率进行输电,使齿轮箱的增速比随之下降,提高了效率,降低了投入成本;同时,减少发电机的极对数,降低了发电机的制造难度。
- 2) 由于分频输电是交流输电系统,没有直流输电诸如极化、电场效应等一些固有问题。
- 3) 由于输电频率降低,可能更有利于断路器选相分闸技术的实现,减小断路器体积和成本。虽然低频变压器成本会有所上升,但是仍可以控制。
- 4) 降低输电频率可以减小输电线路的等效距离,因此可以直接将风电送至承受冲击能力强的负荷中心,提高风电的穿越功率极限,减小风电给配电网带来问题,有利于风电的发展。

### 1.2 变频器的选择

分频输电系统中最关键的器件是实现不同频率系统连接并进行能量交换的变频装置,现阶段主要使用电力电子装置实现两侧不同频率系统的互联。根据电力电子装置原理,直接变频的交交变频器及间接变频的交直交变频器都可以实现这一功能。

从结构、成本、运行特点、控制策略、谐波含量和无功消耗几个方面可以对交交变频器和交直交变频器进行初步比较。可以看出两种变频设备都可以应用于分频风电系统,实现两个不同频率系统的连接,但各有利弊。

经过比较,可以得出以下结论:

- 1) 交交变频器结构较为复杂,由72个桥臂和一个与工频侧联结的换流变压器构成。而交直交变频器仅由24个桥臂、两个分别与两侧系统相连的换流变压器以及一个平波电抗器构成。但是交交变频器效率略高于后者;同时由于省去了低频侧换流变压器,因此其成本较低于后者,大约为交直交变频器的80%。
- 2) 交交变频器属于直接环流装置,因此其控制方式及谐波含量都比交直交变频器复杂。
- 3) 交交变频器仅从工频侧吸收无功,而交直交变频器需要从工频与低频两侧同时吸收无功。
- 4) 在电力系统中,交直交变频器使用经验多于交交变频器。

由此可见,在进行分频输电的实际工程中,需要根据当时的科研、工艺及经费情况合理地选择交交变频器与交直交变频器。但是从经济性与效率角度考虑,交交变频器占有一定得优势。

## 2 风电并网系统穿越功率极限计算

并网系统对穿越功率极限的影响是并网系统技术评估的重要部分。基于静态安全约束计算风力发电穿越功率极限。当风电接入系统时,首先需要考虑的是风电的接入是否会引起系统静态安全性能的下降。

风电穿越功率极限的本质就是系统保持其静态安全性能的基础上所接受的最大风能。这些静态安全性能包括:节点电压不越限、线路功率在允许范围内、各个发电机和无功补偿装置的出力不超过额定值。因此,风力发电穿越功率极限计算的问题可以等效为一个优化问题:

$$\begin{aligned} \max P_{\text{wind}} \\ \text{s. t. } h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,等式约束条件  $h(x) = 0$  主要指系统要满足潮流约束。特别的,当风能利用分频输电并入系统时,需要满足以下几组功率方程:

### 1) 工频侧节点功率方程

工频侧节点功率方程与传统的交流系统潮流计算节电功率方程具有相同的形式,即

$$\Delta P_i = P'_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$\Delta Q_i = Q'_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

式中  $P'_{is}$ 、 $Q'_{is}$  为考虑分频系统后的修正输入的有功、无功功率,计算方法如式(4)、式(5)定义:

$$P'_{is} = \begin{cases} P_{iG} - P_{iL} & i \neq nI \\ P_{iG} + P_{iI} - P_{iL} & i = nI \end{cases} \quad (4)$$

$$Q'_{is} = \begin{cases} Q_{iG} - Q_{iL} & i \neq nI \\ Q_{iG} + Q_{iI} - Q_{iL} & i = nI \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、式(5)表明,与变频变压器直接相连的工频侧节点,其注入功率还需考虑低频侧通过变频器向工频侧注入的有功、无功功率。

### 2) 低频侧节点功率方程

低频侧节点功率方程在形式上与工频侧节电功率方程类似,但是由于频率不同,一些物理量需要进行处理。其方程如式(6)、式(7)所示。

$$\Delta P_k = P'_{ks} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B'_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad (6)$$

$$\Delta Q_k = Q'_{ks} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B'_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \quad (7)$$

式中  $P'_{ks}$ 、 $Q'_{ks}$  为低频系统节点注入功率,可由式(8)、式(9)进行计算:

$$P'_{ks} = \begin{cases} P_{kG} & k \neq nL \\ P_{kG} - P_{Ll} & k = nL \end{cases} \quad (8)$$

$$Q'_{ks} = \begin{cases} Q_{kG} & k \neq nL \\ Q_{kG} - Q_{Ll} & k = nL \end{cases} \quad (9)$$

同时,由于低频侧频率不同,还需对导纳阵进行修正,因此式(6)、式(7)中

$$B'_{ij} = B_{ij} \frac{f_{In}}{f_L} \quad (10)$$

式中:  $B_{ij}$  为工频条件下计算出的电纳值;  $f_{In}$  为工频系统频率;  $f_L$  为低频系统频率。

### 3) 变频器方程

根据变频器模型<sup>[13]</sup>,忽略换流变压器有功损耗时,可以得到修正方程为

$$\Delta d_1 = V_{nL} - 6\sqrt{3} \cdot V_{nI} \cdot k_v / (k_{T1} \cdot \pi) = 0 \quad (11)$$

$$\Delta d_2 = P_{Ll} - P_{I1} = 0 \quad (12)$$

$$\Delta d_3 = Q_{I1} - f(P_{Ll}, Q_{Ll}, k_v, C_{com}) = 0 \quad (13)$$

式中:  $n_L$  与  $n_I$  分别为低频系统和工频系统中直接与变频器单元相连的节点编号;  $k_v$  为变频器电压调制系数;  $V_{nI}$ 、 $V_{nL}$  分别为节点  $n_I$  和  $n_L$  的电压;  $k_{T1}$  为换流变压器变比;  $P_{Ll}$  为低频系统  $n_L$  节点向变频器注入的有功功率;  $P_{I1}$  为变频器向工频系统  $n_I$  节点注入的有功功率;  $Q_{Ll}$  为低频系统  $n_L$  节点向变频器注入的无功功率;  $Q_{I1}$  为变频器向工频系统  $n_I$  节点注入的无功功率;  $Q_{com}$  为工频系统补偿的无功容量。

而不等式约束  $g(x) \leq 0$  则包括:

1) 节点电压约束: 每个节点的电压必须在规定范围内,即

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (14)$$

式中:  $V$  为节点电压向量;  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  为节点电压上、下限向量。

2) 线路功率约束: 每条线路传输的功率必须小于规定值,即

$$P_l \leq P_{l\max} \quad (15)$$

式中:  $P_l$  为线路传输功率向量;  $P_{l\max}$  为线路传输功率上限向量。

3) 发电机有功出力约束: 发电机有功出力必须在其规定范围内,即

$$P_{g\min} \leq P_g \leq P_{g\max} \quad (16)$$

式中:  $P_g$  为发电机有功出力向量;  $P_{g\min}$ 、 $P_{g\max}$  为发电机有功出力上、下限向量。

4) 无功电源出力约束: 系统发电机等无功电源的无功出力必须小于其额定值, 即

$$Q_{gmin} \leq Q_g \leq Q_{gmax} \quad (17)$$

式中,  $Q_g$  为无功电源无功出力向量;  $Q_{gmin}$ 、 $Q_{gmax}$  为无功电源无功出力上、下限向量。

由于风电具有很强的随机性, 可能在很短时间内发生较大的变化。因此, 为了防止系统失去稳定, 系统必须留出充足的备用约束, 同时还必须满足足够的爬坡速度。因此, 式(16)的约束中还需要增加旋转备用约束和爬坡速率约束。

5) 系统旋转备用约束:

$$\sum (P_{gimax} - P_{gi}) \geq P_{sr}^{up} \quad (18)$$

$$\sum (P_{gi} - P_{gimin}) \geq P_{sr}^{dn}$$

式中:  $P_{gi}$  为第  $i$  台发电机实际出力;  $P_{gimax}$ 、 $P_{gimin}$  为第  $i$  台发电机出力上、下限;  $P_{sr}^{up}$ 、 $P_{sr}^{dn}$  为系统上旋转备用和下旋转备用。

6) 系统爬坡速度约束:

$$\sum P_{i\_Ramp} \geq \eta P_{wind} \quad (19)$$

式中:  $P_{i\_Ramp}$  为第  $i$  台发电机的爬坡速度;  $\eta$  为风电最快变化率。

同理可以看出, 若式(16)中的等式约束为工频系统的潮流约束, 该方法依然可以用于传统的风电并网系统穿透率的计算。

### 3 风电经分频输电并网系统穿越极限功率算例分析

#### 3.1 测试系统

测试系统如图2所示。

该测试系统基于 RTS-24 系统<sup>[14]</sup>, 并将系统外建设一风电场的风能并入系统。设距该风电场最近的节点为节点7, 其距离为50 km, 而该风电场距离节点9这一负荷中心350 km。

#### 3.2 并网方案及穿透率比较

为了分析风电经分频输电系统并入电网的性能, 设计了3种并网方案。

方案1: 利用工频输电系统将风能传输50 km, 并入7号节点。

方案2: 利用工频输电系统将风能传输350 km, 并将风能并入9号节点。

方案3: 利用中心频率16.67 Hz的分频输电系统将风能传输350 km并入9号节点。该方案中, 为

了补偿换流站向工频系统吸收的无功, 特安装无功补偿装置, 并将功率因素补偿到0.95。

在以上3种方案中,  $\eta$  取0.7, 即认为1 min内风电波动的幅度小于风电装机的70%。节点电压限制在0.95~1.1 p.u.之内。线路的传输功率极限参见文献[15]。发电机的出力范围如表1所示。

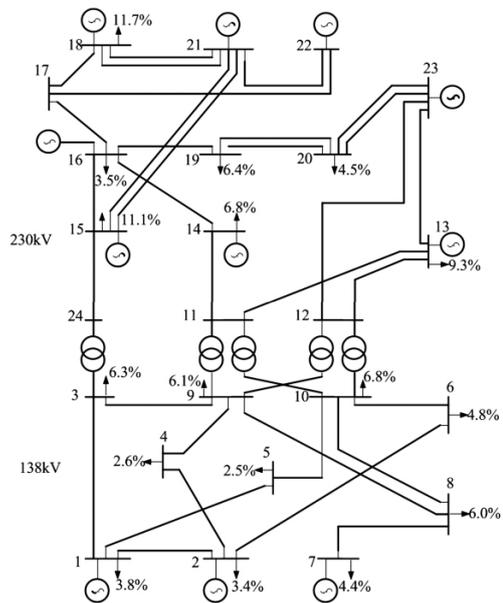


图2 测试系统网络结构

表1 发电机出力及爬坡速率

发电机节点号	最大输出有功/(p.u.)	最小输出有功/(p.u.)	最大输出无功/(p.u.)	最小输出无功/(p.u.)	爬坡速度/(p.u.)
1	1.92	0.576	0.80	-0.50	0.10
2	1.92	0.576	0.80	-0.50	0.10
7	3.00	0.90	1.80	0.00	0.21
13	5.91	1.773	2.40	0.00	0.09
14	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00
15	2.15	0.645	1.10	-0.50	0.08
16	1.55	0.465	0.80	-0.50	0.03
18	4.00	1.20	2.00	-0.50	0.20
21	4.00	1.20	2.00	-0.50	0.20
22	3.00	0.00	0.96	-0.50	N/A
23	6.60	1.98	3.60	-1.25	0.10

由表1可知, 22号节点所接的发电机为水轮机, 因此具有很快的爬坡速度, 同时没有最小输出功率的限制。而其他节点上所接的发电机为火力或者核能发电机, 因此爬坡速度较慢, 同时有严格的最小出力约束。

利用内点法对式(16)所示的优化问题进行求解, 得到3种方案下系统的穿越功率极限如表2所示。

由表2可知, 利用方案1可以将风电就近并入了系

统的边缘,虽然传输距离较短,成本较低。但是,由于7号节点处系统较弱,导致风电的穿越功率极限受到了极大地限制,仅为并入负荷中心(节点9)的32.70%。这使得风电的利用能力受到了限制。方案2与方案3由于都将风电传送至负荷中心,并入节点周围电网结构坚强,因此穿越率有较大的提高。

表2 3种方案下穿越极限功率

方案	穿越功率极限/MW
1	185.2
2	566.3
3	583.6

## 4 结 语

提出了一种风电经分频输电方式并网系统风电穿透率计算方法,并针对算例进行了计算,得到了以下结论:

1) 从结构、成本、运行特点、控制策略、谐波含量和无功消耗几个方面对交交变频器和交直交变频器进行初步比较。可以看出两种变频设备都可以应用于分频风电系统,实现两个不同频率系统的连接,但各有利弊。从经济性与效率角度考虑,交交变频器占有一定得优势。

2) 利用基于静态安全约束的穿越极限功率计算方法,在RTS-24测试系统中对3种风电并网方式进行算例分析。分析认为与将风能就近并入电网边缘相比,利用分频输电或工频输电方式将风能传输至负荷中心,风能的穿越极限功率将提高数倍。

理论与算例分析表明,分频输电系统为风电并网提供了一种全新的方案,具有经济与技术优势,在大型风电场中有着很好的应用前景。

### 参考文献

[1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题. 电力系统自动化, 2007, 27(8): 84-88.

[2] Zhaohong Bie, Gan Li, Hui Liu, et al. Studies on Voltage Fluctuation in the Integration of Wind Power Plants Using Probabilistic Load Flow [C]. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, 2008: 1-7.

[3] Kanellos, F. D., Hatziargyriou, N. D. The Effect of Variable-speed Wind Turbines on the Operation of Weak

Distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Energy Converter, 2002, 17(4): 543-548.

[4] Chen, Z., Spooner, E. Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines [J]. IEEE Transactions on Energy converter, 2001, 16(2): 148-154.

[5] Wang Xifan. The Fractional Frequency Transmission System [A]. IEE Japan Power & Energy, Tokyo, 1994: 53-58.

[6] Wang Xi-fan, Cao Cheng-jun, Zhou Zhi-chao. Ex-perimnt on Fractional Frequency Transmission System [J]. IEEE Transactions on Power System, 2006, 21(1): 372-377.

[7] 王锡凡, 曹成军, 周志超. 分频输电系统的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 6-11.

[8] 滕予非, 王锡凡, 邓敏. 分频输电系统变频器桥臂不导通故障机相关问题 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 69-72.

[9] Teng Yufei, Wang Xifan. Three-phase Short-circuit Fault on the Lower Frequency Bus of Cycloconverter in FFTS [C]. Power Systems Conference and Exposition, USA, 2009.

[10] 迟方德, 王锡凡, 王秀丽. 风电经分频输电装置接入系统研究 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 59-63.

[11] Xifan Wang, Xiuli Wang, Zhaohong Bie. Integrating Wind Farm into Grid via FFTS [C]. Proceedings of 5th Nordic Wind Power Conference, Demark, 2009.

[12] 朱卫平, 王秀丽, 王锡凡. 变速变频风力发电系统最优风能捕获运行方式 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 94-98.

[13] Zhu wei-ping, Wang xi-fan, Wang xiu-li. Optimal Wind Power Capturing Operational Mode of a Variable-speed Variable-frequency Wind Power Generation System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 94-98.

[14] B. R. Pelly. Thyristor Phase-controlled Converters and Cycloconverters [M]. New York: John Wiley & Sons, 1971.

[15] Grigg C., Wong P., Albrecht P., et al. The IEEE Reliability Test System 1996 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

### 作者简介:

李 熠(1981), 硕士、工程师, 主要研究方向为变电站集中监控;

滕予非(1984), 博士、高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其新型输电的分析及控制。

(收稿日期: 2018-05-03)