

分频输电系统中真空断路器的开断性能

刘志远

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 风能作为可再生的绿色能源, 将成为以分布式发电为特征的智能电网的重要组成部分。然而现有电力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。采用分频输电技术可解决上述风电并网问题, 而分频输电会造成断路器开断短路电流时有较长的燃弧时间, 从而引起断路器的开断能力降低。笔者综述了分频输电对真空断路器开断能力的影响。Slade 研究指出当系统频率降低时, 真空断路器的短路电流开断能力的降低与频率降低倍数的平方根有关, 即 $\frac{i_{sc}(f_1)}{i_{sc}(f_2)} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$ 。对于采用横向磁场触头, 触头直径为 62 mm 的 12 kV 真空灭弧室, 其短路电流开断能力从 50 Hz 时的 40 kA 降低到 $16\frac{2}{3}$ Hz 时的 25 kA。

关键词: 真空断路器; 分频输电; 智能电网; 开断能力; 电流频率

中图分类号: TM561.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2011)04-0101-03

Breaking Performance of Vacuum Circuit Breaker in Fractional Frequency Transmission System

LIU Zhi-yuan

(State Key Laboratory of Electric Power Equipment Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Wind power, as a renewable green power, will be a key part of smart grid where distributed generation is an important characteristic. However, the present grid is not convenient to accept wind power. It is reported fractional frequency transmission technologies could solve the problem. But in the fractional frequency transmission system, there appears a longer arcing time for circuit breakers to interrupt short circuit current. The longer arcing time will decrease the interrupting capacity of circuit breakers. This paper discusses the influence of the fractional frequency transmission system on the interrupting capacity of vacuum circuit breakers. Slade pointed that the interrupting capacity of vacuum circuit breakers decline with decrease of frequency as the following function $\frac{i_{sc}(f_1)}{i_{sc}(f_2)} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$. With transverse magnetic field contacts, the interrupting capacity of 12 kV vacuum interrupters with contact diameter 62 mm dropped from 40 kA at 50 Hz to 25 kA at $16\frac{2}{3}$ Hz.

Key words: vacuum circuit breaker; fractional frequency transmission; smart power grids; interrupting capacity; power frequency

0 引言

智能电网是下一代电网, 智能电网应解决现有电网的主要问题, 包括^[1]: ①能量转换效率低, 现有的燃料仅有三分之一的能量转化为电能; ②电能传输能量损耗大, 约有 8% 的电能损失在电能传输过程

中; ③所生产出的电能约有 20% 仅供峰值负荷使用。与现有电网的技术相比, 智能电网的改进和提高包括^[1]: 电能的产生由集中式转变为分布式, 电网的架构由分级式转变为网络式, 电网的信息由单向传递式转变为双向传递式, 电网的故障由人工诊断转变为电网自诊断和自恢复等。

风能作为可再生的绿色能源, 对于解决全球性

的能源危机和减少碳排放具有重要意义。因此风能将成为以分布式发电为特征的智能电网的重要组成部分。然而风电的联网问题是智能电网技术中亟待解决的重要问题之一,其瓶颈主要表现在2个方面^[2]:①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,1塔1发电机1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;②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,因此现有电力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。

西安交通大学王锡凡教授课题组提出采用分频输电技术来解决上述风电并网问题^[2-3]。分频风电系统是在风力发电和输电过程中采用分频交流电(如50/3 Hz),风电场中所有的风力机通过控制系统发出相同低频率的电(50/3 Hz),经汇流母线收集到一起后升压至高电压,如110 kV以上,然后通过远距离输电将低频电能(如50/3 Hz)送到负荷中心地区,送入系统时再利用AC/AC变频器转换成50 Hz电能,送入负荷中心电网。这样利用同样的输电线路可将电能输送到更远的地区,因而便于将风电接到较强受端系统,增强了系统的抗扰动能力,从而使电力系统可承受更大规模的风电机群。同时,由于分频输电系统电抗减少,受电端的电压波动也会相应降低。另外,风力发电机发出分频电力时,可大幅度减化齿轮箱,降低齿轮,提高机组寿命,降低造价。

1 分频输电对真空断路器开断性能的影响

文[2]中讨论了分频输电对风电系统中相关元件的影响,包括风机、齿轮箱、升压变压器、输电线路、AC/AC变频器等。但该文还未提及系统中的重要保护元件——断路器。当系统频率降低时,断路器的燃弧时间会变长。例如断路器在50 Hz下,一个对称短路电流的半波为10 ms,但在 $16\frac{2}{3}$ Hz时,一个半波为30 ms。较长的燃弧时间对各种灭弧介质和灭弧机理的断路器都会造成短路电流开断困难,从而引起断路器的开断能力降低。笔者的目标是综述分频输电对真空断路器开断能力的影响。

对于1台设计运行在50 Hz的真空断路器而言,当其运行在 $16\frac{2}{3}$ Hz时,短路电流开断能力应当为多少?文[4-5]进行了相关研究指出:当系统频

率降低时,真空断路器的短路电流开断能力的降低与频率降低倍数的平方根有关;以一个横向磁场真空灭弧室为例,在50 Hz系统中开断一个短路电流时,其燃弧时间中有8~9 ms为集聚型真空电弧,在电流过零前有1~2 ms为扩散真空电弧。而同一个真空灭弧室在 $16\frac{2}{3}$ Hz系统中其燃弧在电流过零前将有26~27 ms为集聚型真空电弧。虽然在横向磁场驱动下该集聚型真空电弧沿触头边缘快速旋转,但是在较长的燃弧时间条件下,该柱状电弧将更频繁地加热触头表面的同一位置,导致触头表面过热。这样在电流零区的金属蒸气密度会较高,从而导致开断能力的下降。文[5]假设:①真空灭弧室在开断电流过零后的介质恢复强度与触头间隙的金属蒸气密度成反比;②电流过零后的金属蒸气密度与燃弧期间的电弧能量成正比,电弧能量为

$$\text{电弧能量} = i_{sc}^2 T = \frac{i_{sc}^2}{f} \quad (1)$$

式(1)中: i_{sc} 为短路电流; T 为周期; f 为频率。

则介质恢复强度峰值 $U_{R(\text{peak})}$ 为

$$U_{R(\text{peak})} \propto \frac{f}{i_{sc}^2} \quad (2)$$

因此对于一个给定的介质恢复强度峰值 $U_{R(\text{peak})}$,则有^[4-5]

$$\frac{i_{sc}(f_1)}{i_{sc}(f_2)} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}} \quad (3)$$

式(3)中: f_1 为待求短路电流开断能力的电流频率,Hz; $i_{sc}(f_1)$ 为在频率 f_1 下的短路电流开断能力,kA; f_2 为已知短路电流开断能力的电流频率,Hz; $i_{sc}(f_2)$ 为在频率 f_2 下的已知短路电流开断能力,kA。

12 kV真空断路器在10~60 Hz频率下开断能力随频率下降而下降,见图1,图1中空圈为实验结果,实心圈为公式(3)计算得到的开断能力^[4-5]。试验条件为^[4]:采用2只真空灭弧室进行试验。真空灭弧室直径为102 mm。1只真空灭弧室采用横向磁场触头,开断能力为12 kV/31.5~40 kA。另1只真空灭弧室采用纵向磁场触头,开断能力为12 kV/25~34 kA。触头直径为62 mm,触头材料为CuCr 25。试验用真空断路器配弹簧操动机构,分闸速度为0.4 m/s。开断试验在单相直接实验回路上进行,该回路包括5 MJ的电容器组,电抗器和暂态恢复电压TRV调频回路,短路电流和暂态恢复电压TRV都由该直接实验回路提供。如果一个真空灭弧室在电流零点开断失败,那么短路电流将持续到下一个电流半波。电流频率可由工频调至 $16\frac{2}{3}$ Hz。所施加的暂态恢复电

压 TRV 波形为三相不接地系统中首开相的 TRV 波形。短路电流为对称波形。该真空灭弧室的开断能力从 50 Hz 下的 40 kA 降低到 $16\frac{2}{3}$ Hz 下的 25 kA。对于纵向磁场真空灭弧室其开断能力的下降程度也与横向磁场真空灭弧室近似^[4]。

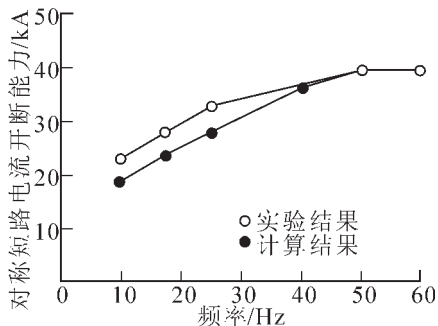


图 1 真空灭弧室开断能力随电路频率的下降而降低

Fig.1 The reduction in the interruption ability of a vacuum interrupter as the circuit frequency is reduced

由于实验得到在 50 Hz 下的开断能力为 40 kA, 因此由公式(3)可得在 10 Hz 下开断能力为 18 kA, 在 $16\frac{2}{3}$ Hz 下开断能力为 23 kA, 在 25 Hz 下开断能力为 28 kA。虽然由公式(3)所得数据有些保守, 但是当 1 台真空断路器在 50 Hz 时的开断能力已知的情况下, 仍可用该公式来评估在更低频率下的开断能力。

2 讨论

2.1 当频率高于工频时真空断路器的开断能力

文[5]讨论了当频率高于 50/60 Hz 时, 其开断能力会怎样变化: 在电流开断后的恢复电压上升率 RRRV 给定的情况下, 其开断能力由电流过零时刻的 $\frac{di_{sc}}{dt}$ 决定。当频率增加时, 由公式(4)可知其短路开断电流 i_{sc} 降低。文[5]的实验结果见图 2, 图 2 中示出 40~100 Hz 频率范围是短路开断的最佳频率区间。

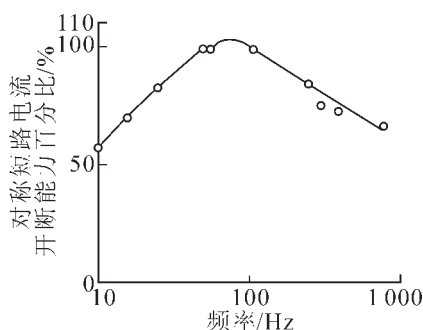


图 2 电力系统频率变化时对真空灭弧室开断能力的影响

Fig.2 The interruption performance of vacuum interrupters as a function of the frequency of the electrical system

$$\left. \frac{di_{sc}}{dt} \right|_{i=0} = -2\pi f i_{sc(\text{peak})} \quad (4)$$

2.2 关于选相分断技术应用于分频输电系统

采用选相分断技术可有效降低电流频率对断路器开断能力的影响。然而选相分断技术对断路器动作时间的分散性要求很高。断路器动作时间的分散性受触头电磨损、机构机械磨损、环境温度和电源值的影响。特别是经常动作和长期不动作 2 种情况下, 动作时间会有差别。动作时间的准确度能否满足要求对可靠性要求极高的电网来说是至关重要的。

目前永磁操动机构的快速发展和广泛应用, 使配永磁操动机构的真空断路器向选相分断的目标更进一步, 因而有可能将选相分断技术应用于分频输电系统中。但是笔者认为采用永磁操动机构实现选相分断技术还需要解决如下问题: ①在复杂的电网谐波中如何正确选择分断相角以及相角选择算法的精度和运算速度能否满足要求; ②电流相角检测装置在高电压大电流复杂电磁环境中的电磁兼容问题能否有效解决。希望这 2 方面的问题解决后, 选相分断技术在分频输电系统中得到应用。

2.3 关于电流零点的 $\frac{di}{dt}$

由于断路器的开断能力由电流零点的 $\frac{di}{dt}$ 值和

暂态恢复电压 TRV 的上升速度 $\frac{du}{dt}$ 的乘积所决定的, 在分频输电系统中, 由于频率降低, 可有效降低断路器开断短路电流时电流零点的 $\frac{di}{dt}$ 值, 这对于断路器的开断是有利的。这有可能是 Slade 的计算结果比实验结果保守的原因之一, 见图 1。

3 结语

在智能电网中解决风电并网问题的途径之一是采用西安交通大学王锡凡教授课题组提出的分频输电技术, 将风电远距离传输至负荷中心电网, 从而使电网可承受较大规模的风电输入。然而分频输电由于其频率降低导致短路电流开断时燃弧时间较长, 因此会造成断路器开断能力的降低。美国伊顿公司 Slade 研究指出在系统频率降低时, 12 kV 真空断路器开断能力的降低与频率降低的平方根有关, 满足关系 $\frac{i_{sc}(f_1)}{i_{sc}(f_2)} = \sqrt{\frac{f_1}{f_2}}$ 。该公式可用于评估真空断路器在低于工频频率下的开断能力。

- [2] 关象石,王风山,李世英,等.国内外雷电灾害事故案例精选[M].北京:气象出版社,1997.
GUAN Xiang-shi, WANG feng-shan, LI Shi-ying, et al. The lightning destructive accidents collection of our country and other countries[M]. Beijing: Meteorology Press, 1997.
- [3] FISHER B D, BROWN P W, PLUMER J A. Summary of NASA storm hazards lightning research, 1980-1985[C]// Proceedings of 11th International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, USA[s.n.], 1986:4.
- [4] STAHMANN J R. Triggered natural lightning near an F-100 aircraft[C]// Proceedings of Lightning and Static Electricity Conference, USA[s.n.], 1968:123-134.
- [5] EBERLE M, MARCORDES R, JAEGER D, et al. Lightning protection design methodology for a very large non-rigid airship [C]// Proceedings of International Conference on Lightning and Static Electricity, [s.l.]: Society of Automotive Engineers, 2001:29-31.
- [6] GRUDEN M M, WALKO L C, SCHWEICKART D L, et al. Analysis of simulated aircraft lightning strikes and their electromagnetic effects: AFRL-PR-WP-TR-2001-2024 [R]. Wright-patterson Air Force Base, Ohio, USA, Air Force Research Laboratory, 2001.
- [7] CHIFFORD D W. Laboratory tests to determine lightning attachment points with small aircraft models[C]// Proceedings of Conference on Certification of aircraft for Lightning and Atmospheric Electricity Hazards(Engineering Test), Chatillon [s.n.], 1978:9.
- [8] CHIFFORD D W. Scale model lightning attach point testing [C]// Proceedings of Lightning and Static Electricity Conference, England[s.n.], 1975.
- [9] UMAN M A. Natural artificially-initiated lightning and lightning test standards[J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(12):1548-1565.
- [10] LITTLE P F. Laboratory tests to determine lightning attachment points with small aircraft models [C]// Proceedings of Conference on Certification of aircraft for Lightning and Atmospheric Electricity Hazards(Engineering Test), France[s.n.], 1978:8.
- [11] MIL-STD-464—1997. Electromagnetic environment effects requirements for systems[S].
- [12] MIL-STD-1757—1980. Lightning qualification test techniques for aerospace vehicles and hardware[S].
- [13] MIL-STD-1795—1989. Lightning protection of aerospace vehicles and hardware[S].
- [14] HB 6129—1987. 飞机雷电防护要求及试验方法[S].
HB 6129—1987. The requirements and test methods of aircraft lightning protection[S].
- [15] GJB 2639—1996. 军用飞机雷电防护[S].
GJB 2639—1996. Lightning protection of military aircraft[S].
- 温浩(1965—),男,高级工程师,工学博士,主要从事电磁散射、电磁兼容性和飞机雷电防护理论和试验研究等。

(上接第 103 页)

致谢:

作者感谢西安交通大学王秀丽教授和别朝红教授对该文的建议和讨论。

参考文献:

- [1] FARHANGI H. The path of the smart grid[M]. IEEE Power & Energy Magazine, 2010.
- [2] 迟方德,王锡凡,王秀丽.风电经变频输电装置接入系统研究[J].电力系统自动化,2008,32(4):59-63.
CHI Fang-de, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li. A new wind power grid connection method based on fractional transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4):59-63.
- [3] 王锡凡,曹成军,周志超.变频输电系统的实验研究[J].中国电机工程学报,2005,25(12):6-11.
WANG Xi-fan, CAO Cheng-jun, ZHOU Zhi-chao. Experiment on fractional frequency transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12):6-11.
- [4] SLADE P G, SMITH R K. A comparison of the short circuit interruption performance using transverse magnetic field contacts and axial magnetic field contacts in low frequency circuits with long arcing times [C]// Proceedings of 21st International Symposium on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Yalta, 2004:337-340.
- [5] SLADE P G. The vacuum interrupter theory, design, and application[C]// Boca Raton, London, New York: CRC press, 2008:466-468.
- 刘志远(1971—),男,博士,副教授,主要从事真空开关和真空电弧理论研究。