

基于不同风速下双馈风电机组一次调频控制策略研究

双馈风电机组逐步成为风电市场主流机型，然而其具备的有功、无功解耦控制策略却使机组有功功率无法响应电力系统频率的变化，从而加剧了系统频率稳定性问题。根据不同的风速条件，提出超速与桨距角控制相协调的减载控制策略，使得预留的功率作为调频备用，同时结合转子惯性综合控制进行一次调频。该控制策略可以使双馈风电机组有效支持系统频率调整。最后通过仿真结果验证了双馈风电机组综合调频控制策略的有效性。

赵 琪 张江滨 张 刚/西安理工大学水利水电学院

0 引言

随着风电的单机装机容量以及在电网中的渗透率不断增加，大规模风力发电场集中接入将给电网安全稳定运行带来严峻挑战^[1]。目前，双馈风电机组（DFIG）逐步成为风电市场主流机型。然而，机组有功、无功解耦控制使其有功功率无法响应电网频率的变化。此外，DFIG风电机组通常运行在最大功率点跟踪（MPPT）模式下，当系统频率发生变化时，不能提供额外的有功功率参与调频控制，进而失去了类似传统机组的一次调频能力^[2]。因此，大规模风电场并入电网后将导致系统惯性降低，调频能力不足，从而降低了整个系统的频率稳定性。

目前，国内外学者对双馈风电机组的频率控制进行了一些研究。文献[3]提出了双馈风力发电机组通过增加频率控制策略，释放或者吸收转子中的一部分动能以相应增加或者减少有功出力，实

现风电机组的频率控制，但这类方法只能短期支持频率响应。文献[4]提出下垂控制，并将下垂控制和发电机惯性控制相结合，控制发电机的电磁转矩来具备一次调频能力。此方法改善了机组的惯性响应，但该控制方法与最大功率跟踪控制间存在相互矛盾。文献[5-6]通过控制风机转速和桨距角，使风机在正常运行时输出功率小于其最大功率，为风机调频提供有功备用，当系统频率发生变化时，能够很好地参与系统调频。文献[7]根据不同的风速模式，提出了超速与桨距角控制相协调的控制策略，提高了风电机组参与调频的能力。文献[8-9]通过转子的超速控制和功率-频率的下垂控制二者结合的控制策略，既增加了系统的惯性，又使得机组可以增发参与调频的备用功率，更好地达到调频的要求。

通过分析双馈风电机组调频的特性，根据风速状况提出超速与变桨控制协调的减载控制策略，使得预留的功率作为调频备用。同时结合转子惯性综合控制进行一次调频。本文提出在低风速下仅采用超速控制策略，中风速下采用超速和桨距角控制相协调的控制策略，高风速下仅采用桨距角控制策略。最后通过仿真结果验证了双馈风电机组协调控制策略的有效性。

1 双馈风电机组调频特性分析

1.1 转子惯性控制

风电机组机的惯性来自转子储存的



赵 琪/硕士研究生

关键词/Keywords

双馈风电机组 ·
超速控制 ·
桨距角控制 ·
一次调频 ·

国家自然科学基金青年基金（51507141）。

动能,即

$$E = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (1)$$

式中, ω_m 为风机的机械转速; J 为风机的转动惯量。

风力机输出的有功功率为

$$P = \frac{de}{dt} = J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2)$$

惯性常量 H 为

$$H = \frac{E}{S} = \frac{J \omega_s^2}{2S} \quad (3)$$

式中, ω_s 为风机的额定转速; S 为风机的额定功率。

结合式(2)、式(3)得出

$$\frac{P}{S} = 2H \frac{\omega_m}{\omega_s} \frac{d(\omega_m / \omega_s)}{dt} \quad (4)$$

$$\bar{P} = 2H \bar{\omega}_m \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} \quad (5)$$

通过上述分析可知,通过改变转速,可以释放或吸收风电机组转子所存储的动能,从而增加风机的惯性。为了使DFIG风电机组具有类似于传统机组的惯性响应特性,可将虚拟惯性控制环节引入双馈风电机组的最大功率追踪模块。但是惯性控制响应时间很短(5 s),只能在频率变化的瞬间,不能很好地达到调频的要求,可以通过附加频率下垂控制环节进一步改善。

与同步发电机组一次调频的控制原理相似,风电机组通过附加下垂控制,可以在系统频率变化过程中始终调节机组电磁功率补偿系统的功率缺额,能够改善机组的惯性响应。下垂控制有功增量即

$$\Delta p = p_1 - p_0 = -(f_{\text{mean}} - f_{\text{ref}}) / R \quad (6)$$

式中, f_{mean} 为系统频率的测量值; f_{ref} 为系统频率参考值; R 为下垂控制系数; p_1 为测量频率下的输出功率; p_0 为参考频率下的输出功率。

综上所述,下垂控制与风电机组惯性控制结合使用,惯性控制可以在频率变化的瞬间,为频率提供动态支撑。下垂控制可以很好地达到调频的要求,使得频率有着很好的稳态响应。但由于没有功率备用,该控制策略与MPPT控制间存在矛盾,

难以确保风电机组在动态调节过程的稳态运行。

1.2 功率备用控制

功率备用控制是通过超速控制或变桨控制来降低风能捕获系数,使风电机组运行在次优的功率跟踪点上,从而获得一定的有功备用,这样的次优运行称为风电机组的减载运行。

正常运行时风力机捕获的最大机械功率为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi C_p(\lambda, \beta) R^2 v^2 \quad (7)$$

式中, ρ 为空气的密度; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风力机的风能捕获系数; v 为风速; R 为风轮半径; λ 为叶尖速比, $\lambda = \omega_r R / v$, ω_r 为风力发电机转速; β 为叶片桨距角。其中

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.517 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} + \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (8)$$

为确定风电机组一次调频所需的有功备用,定义风电机组减载水平为 $d\%$,则

$$P_L = (1 - d\%) P_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \rho \pi C_{p,L} R^2 v^3 \quad (9)$$

$$P_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \rho \pi C_{p,\text{max}} R^2 v^3 \quad (10)$$

式中, P_L , P_{opt} 分别为减载运行时和最大功率跟踪时的参考功率; $C_{p,L}$ 为风力机减载运行时的风能捕获系数; $C_{p,\text{max}}$ 为最大风能捕获系数。

风速不变时,由上式可得

$$C_{p,L} = (1 - d\%) C_{p,\text{max}} \quad (11)$$

由式(11)可知,只要使风能捕获系数下降 $d\%$ 即可实现对风机的减载。由式(7)、式(8)可知,风能捕获系数 C_p 与叶尖速比 λ 和桨距角 β 有关,且 $\lambda = \omega_r R / v$ 。则同一风速 v_0 下,可通过改变桨距角来改变风能捕获系数,也可通过超速控制来改变风能捕获系数,从而实现风机减载运行,为系统一次调频提供有功备用。

如图1所示,在最大功率追踪(MPPT)方式下,沿曲线ACD运行。与之相对应,当以恒定百

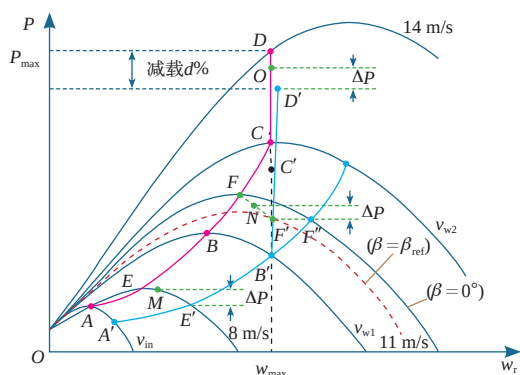


图1 DFIG输出功率与转速关系曲线

分比减载时，风电机组沿曲线 $A'B'D'$ 运行。

1) 沿 $A'B'$ 段运行时，这段运行工况为低风速段，其风速范围为 $v_{in} \sim v_{w1}$ ， v_{in} 为切入风速， v_{w1} 为仅凭超速控制实现 $d\%$ 减载的风速上限。在此工况下，风电机组仅靠转子超速控制就能实现设定的减载水平，桨距角 $\beta = 0^\circ$ 保持不变。因为当风速在 v_{w1} 下，减载曲线上的 B' 点功率是MPPT曲线上 B 点功率的 $1-d\%$ ， B' 对应转速上限 w_{max} 。稳定运行时各参数为： $\beta = 0^\circ$ ； $w_{ref} = \lambda_L v / R$ 。由式(11)可得

$$C_{p,L}(\lambda_L, 0) = (1-d\%)C_{p,max}(\lambda_{opt}, 0) \quad (12)$$

式中， λ_L 为减载 $d\%$ 的叶尖速比； λ_{opt} 为最佳叶尖速比。

式(12)与风速无关，一旦计算出 $C_{p,L}(\lambda_L, 0)$ ，对应的叶尖速比 λ_L 也可由式(8)求得。则该工况下发电机功率参考值 P_L 为

$$P_L = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 w_r^3 C_{p,L} / \lambda_L^3 = k_L w_r^3 \quad (13)$$

式中， k_L 为减载时的功率曲线跟踪比例系数，且 $k_L = 0.5 \rho \pi R^5 C_{p,L} / \lambda_L$ 。

2) 运行在 $B'C'$ 段，这段运行工况为中风速段，其风速范围为 $v_{w1} \sim v_{w2}$ ，由于转速已达到上限，则需要通过桨距角控制进一步限制功率，来实现预期的减载水平。此时功率参考值与 $A'B'$ 段的计算方法相同，稳定运行时其他参数为 $\beta = \beta_{ref}$ ； $w_{ref} = w_{max}$ ；其中， β_{ref} 为超速控制与变桨控制结合时的参考桨距角。由式(11)可得

$$C_{p,L}(\lambda_{ref}, \beta_{ref}) = (1-d\%)C_{p,max}(\lambda_{opt}, 0) \quad (14)$$

$$\lambda_{ref} = w_{max} R / v \quad (15)$$

由式(14)计算出 $C_{p,L}(\lambda_{ref}, \beta_{ref})$ ，不同风速下对应不同的叶尖速比，由式(15)求得，再通过式(8)求得 β_{ref} 。

3) 运行在 $C'D'$ 段时，这段运行工况为高风速段，其风速范围为 $v_{w2} \sim v_{out}$ ， v_{out} 为切出风速，此工况下转子超速已无法实现减载，只能依靠桨距角控制实现恒定减载，由式(11)可得

$$C_{p,L}(\lambda_{ref}, \beta_{ref}) = (1-d\%)C_{p,opt}(\lambda_{opt}, \beta_0) \quad (16)$$

此时， $\lambda_{ref} = \lambda_{opt} = w_{max} R / v$ ， $C_{p,opt}(\lambda_{opt}, \beta_0)$ 为风机高风速满载运行时的风能捕获系数。

2 双馈风电机组调频控制策略

基于上述功率备用控制的分析，可将控制策略分成低、中、高风速三种控制模式。

2.1 低风速控制策略

该工况下由于发电机的转速较低，仅用超速控制即可满足 $d\%$ 的减载。此时，不论系统频率下降或者上升，通过转子惯性控制和下垂控制的综合控制，使得系统在频率发生变化时来增加或者减少功率 ΔP ，使得风电机组参与系统的一次调频。如图2所示，在 $v = 8 \text{ m/s}$ 时，风电机组通过超速控制减载运行于 E' 点，当频率下降时通过综合惯性调节增加有功出力，最后运行于 M 点。

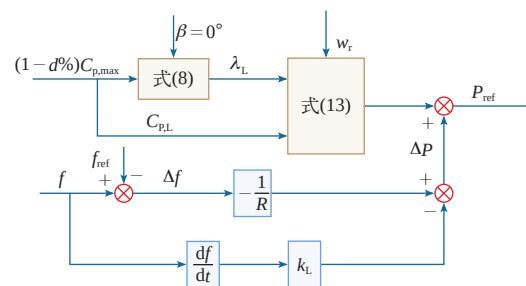


图2 低风速控制模型

2.2 中风速控制策略

在中风速工况下，取 $v = 11 \text{ m/s}$ （见图1），风电机组如果继续运行在 $1-d\%$ MPPT曲线，转速将超出最大转速运行于 F'' 点，对发电机的运行极为不利。此时通过低风速的控制策略已经无法满足调频要求，所以需通过转速和桨距角控制结合使得发电机转速降低，从而来实现减载，使风电机组

组运行于 F' 点。当频率下降时通过综合调频控制增加有功出口,最后运行于 N 点,控制模型如图3所示。

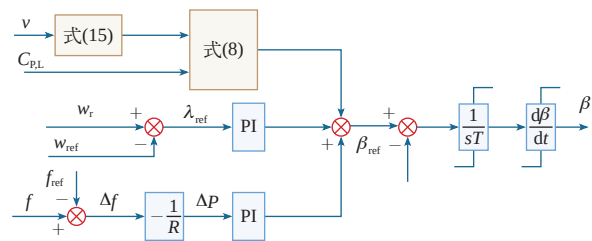


图3 中风速控制模型

2.3 高速控制策略

高速工况下,转速已达到最大转速,此时转速控制已经失效,只能通过变桨控制来改变功率以适应频率的变化。如果此时继续采用传统的桨距角控制策略,由于转速恒定,风力机输出功率将恒定保持不变,风机不具备调频能力,因此需要改变原来的桨距角控制策略。

当机组追踪最大功率曲线运行时,对不同的风速, C_p 和 λ 保持定值不变。类似地,当机组追踪减载运行曲线时, C_p 和 λ 也保持定值不变。则由式(8)可以看出, β 成为关于 C_p 的单变量函数,可由简单的二次函数拟合所得^[10],即

$$\beta = F(C_p) = -3.2821C_p^2 - 10.0528C_p + 5.4859 \quad (17)$$

当系统频率出现偏差时,通过下垂控制的调差系数可以计算出风电机组需要调节的有功功率 ΔP ,根据式(7)计算出此时 C_p 的大小,再通过上式可以调整桨距角,使风电机组达到一次调频要求,控制模型如图4所示。

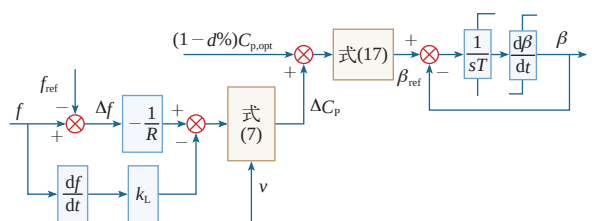
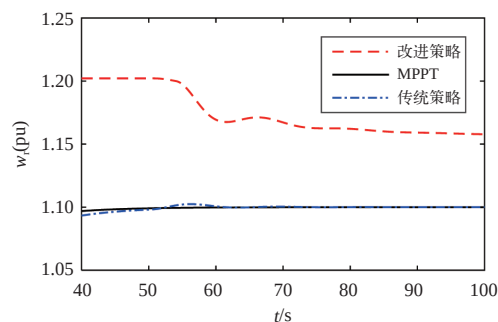


图4 高速控制模型

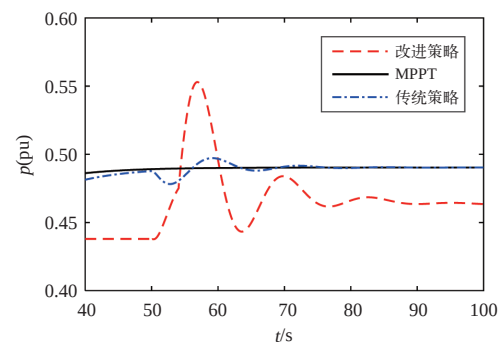
3 仿真分析

在Matlab中建立9 MW (6台×1.5 MW) 的双馈风电机组模型,对比传统组合控制策略和协调

控制策略,通过仿真验证控制策略对风电机组参与一次调频的有效性。双馈感应风电机组惯性常数 $H=5.04$ s,减载程度 $d\%=10\%$,频率从50 Hz下降至49.8 Hz,在不同风速下进行仿真,选取其中有代表性的风速,即8 m/s、11 m/s和14 m/s,仿真结果如图5~图7所示。



(a) 发电机转速变化



(b) 风电机组输出功率变化

图5 低风速下仿真结果

3.1 低风速

取 $v=8$ m/s,图5反映了低风速综合调频控制下发电机转速、桨距角和风电机组输出功率的变化。此工况下 $\beta=0^\circ$ 保持不变。从图5中可以看出,采用改进控制策略,风电机组减载运行给调频提供功率备用,当系统频率降低时,通过综合惯性控制降低发电机转速来释放转子动能,快速地为系统提供持续的有功支持,从而满足调频要求。

3.2 中风速

取 $v=11$ m/s,图6反映了中风速综合调频控制下发电机转速、桨距角以及风电机组输出功率的变化。当频率下降时,从图6中可以看出,传统控制策略和无附加控制策略的转速恒定不变,改进控制策略不仅可以通过超速控制来减载运行,还

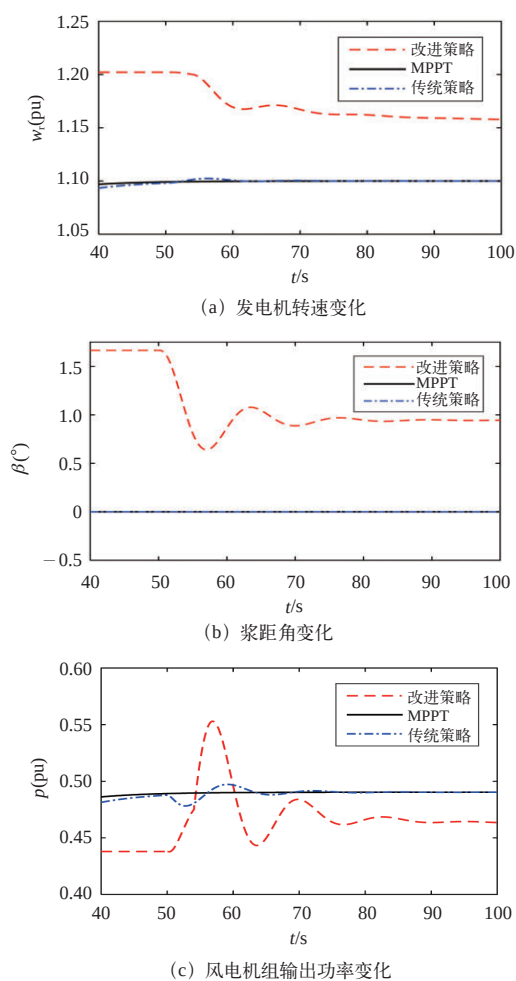


图6 中风速下仿真结果

可以通过调节桨距角改变风电机组输出功率，从而满足调频要求。

3.3 高风速

取 $v=14\text{ m/s}$ ，图7反映了高风速综合调频控制下发电机转速、桨距角以及风电机组输出功率的变化。从图7中可以看出，风电机组通过桨距角控制使风机减载运行，然后控制桨距角变化，来增加发电机出力，相比传统控制策略能够提供更多的功率支撑，从而满足调频要求。

4 结束语

通过研究双馈风电机组的一次调频特性，将提出的减载控制方案与调频控制结合起来综合调频，使风电机组更好地达到调频的要求。通过理论和仿真分析得出以下结论。

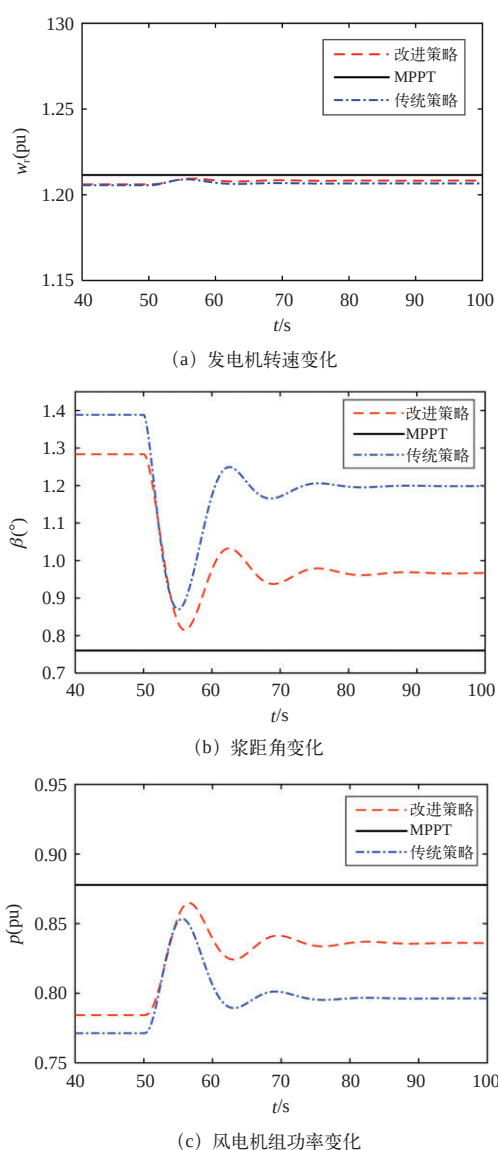


图7 高风速下仿真结果

1) 根据不同的风速条件，将风速分为低风速、中风速和高风速三种模式。对应不同的风速段推导出不同的减载控制策略，为一次调频提供有功备用。本文提出的超速与桨距角控制相协调减载的控制方案可以减少风机的变桨动作，当转速控制无法满足减载要求时，桨距角控制投入。

2) 在低风速时，通过超速减载和惯性控制相结合的综合控制策略；在中风速时，通过转速和桨距角结合的综合控制策略；在高风速时，通过桨距角控制策略。

3) 仿真结果表明，所提出的综合调频控制策略能较好地响应系统频率变化，改善风电机组的

一次调频能力。

参考文献

- [1] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (25): 4304-4314.
- [2] Johan Morren, Sjoerd W H de Haan, Wil L Kling, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1): 433-434.
- [3] 薛迎成, 邵能灵, 刘立群, 等. 双馈风力发电机参与系统频率调节新方法 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (11): 2839-2845.
- [4] 薛迎成, 邵能灵, 宋凯, 等. 变速风力发电机提供调频备用容量研究 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (8): 75-80.
- [5] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (17): 20-25, 43.
- [6] 范冠男, 刘吉臻, 孟洪民, 等. 电网限负荷条件下风电场一次调频策略 [J]. 电网技术, 2016, (40) 7: 2030-2037.
- [7] Juankorena X, Esandi I, Lopez J, et al. Method to enable variable speed wind turbine primary regulation [C]. International Conference on Power Engineering, 2009: 18-20.
- [8] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略 [J]. 电网技术, 2015, 39 (9): 2385-2390.
- [9] 严干贵, 张菁, 高扬, 等. 参与系统调频的风电机组控制策略研究综述 [J]. 广东电力, 2015 (4): 19-25, 35.
- [10] 吴子双, 于继来, 彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (5): 112-119.

(收稿日期: 2017-02-22) EA

广告 | AD



Weidmüller 

魏德米勒MultiMark标记系统 —使电气柜内的联接清晰可见

工业4.0使电气柜内的联接布线越来越复杂, 电气元件及其联接的标记能有效降低误操作的风险并帮助现场维护。魏德米勒MultiMark标记系统, 在整个工程阶段的初期, 就提供针对这些需求的专业解决方案, 150种新的标记产品几乎可以涵盖所有的标识需求。MultiMark标记系统包括软件、标记号和打印机, 快速打印, 快速标记, 简便的操作以及清晰的打印内容使整个标记流程得以优化。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司

电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn