

離岸風力機標準適用性探討

林玉楚^{1*} 賴文政¹ 黃金城²

摘要

我國為推動能源轉型，同時帶動風力發電產業本土化，積極發展離岸風力發電技術。離岸風力機國際標準IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437並非針對臺灣本土的環境條件所制定的標準。本研究進行國內標準CNS 15176-3、國際標準IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437的差異性比對，以探討各標準對國內本土環境之適用性。主要研究內容包含：分析IEC 61400-3-1、DNV-ST-0437及CNS 15176-3的現況及其關係；比較各標準之風力機等級(Wind Turbine Classes)、安全係數(Safety Factors)及設計載重狀況(Design Load Cases, DLC)差異性並探討其原因；分析DLC之紊流與穩流設計情形之不同，並比較其極限載重結果；計算各離岸風力機標準之地震及颱風設計載重狀況，分析其極限載重對風力機之影響。本研究可作為國內本土離岸風力機相關標準制訂之重要參考，以完善國內本土離岸風力機標準。

關鍵詞：離岸風力機，標準，適用性

1. 前言

離岸風電為國家重要的再生能源選項之一，攸關能源轉型，經濟部以「先示範、次潛力、後區塊」3階段策略逐步推動國家離岸風電建設。上緯公司於106年完成國內2支4 MW示範離岸風力機於首座海洋風場(Formosa I)的併聯發電，而正式啟動國內離岸風電的建設。108年11月臺灣首座離岸風場Formosa 1(海洋風電)22支風力機(包含上階段已完工的2支)正式完工啟動；110年9月台電離岸風電第一期風場完成全部21支風力機初始併聯，該風場是我國第二個完工的離岸風場，年均發電量約3.6億度，可供給近9萬家戶一年用電。

近年來，為降低發電成本，離岸風力機廠家正朝向風力機大型化發展。大型風力發電市場可以分為陸域風力發電與離岸風力發電，全球陸域風電市場占比較高，但未來則因逐漸飽和預測將持平發展；離岸風電雖目前占比較小，但未來成長比例較快，成為各界關注焦點。全球風能協會預測全球風電裝置容量如圖1所示，預估2022年離岸風電裝置容量為8.7 GW，而2026年離岸風電裝置容量可達31.4 GW，可見離岸風電將快速成長。

離岸風場具有較陸域風場更優質之風力來源，包括更高的平均風速及較低的紊流。但離岸風力機的設計相較於陸域風力機更為複雜，而且其相對的設計標準也不一樣，需要考慮及

¹行政院原子能委員會核能研究所機械及系統工程專案 助理研究員

²行政院原子能委員會核能研究所機械及系統工程專案 研究員兼組長

*通訊作者，電話：03-4711400#3344，電郵：linyuchu@iner.gov.tw

收到日期: 2022年05月13日

修正日期: 2022年07月14日

接受日期: 2022年08月10日

New wind power installations outlook 2022-2026 (GW)

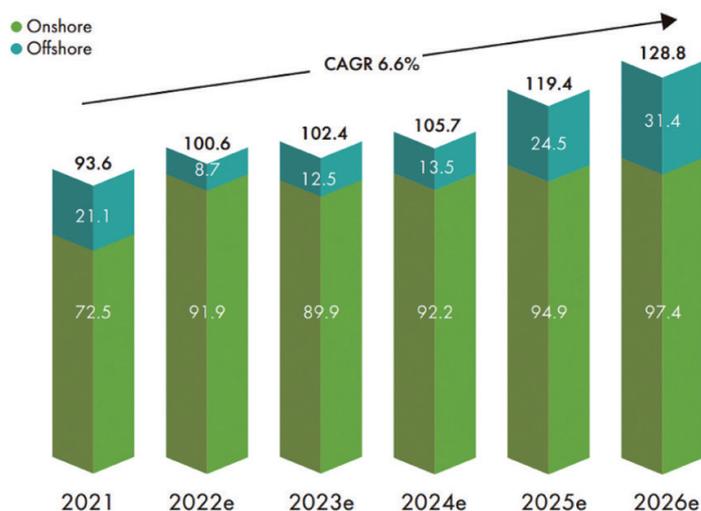


圖1 全球風電裝置容量預測(GWEC, 2022)

接受更多樣及嚴苛的設計載重狀況，多出波浪、海流及水位等外部環境條件。目前國外多數的離岸風力機系統廠家及經驗主要仍以歐洲北部國家為主，包括：英國、丹麥及德國等，但其對於位於亞熱帶多颱風及地震帶之臺灣的特殊地理環境並無實際的經驗。如圖2所示，為確保未來國內本土離岸風力機的運轉安全及可靠性，本研究針對國內CNS及國際IEC、DNV等離岸風力機標準進行相關差異性比對及分析，配合本土重要載重狀況進行本土技術標準

評估，比對國際標準差異性，以探討各離岸風力機標準對國內本土環境之適用性。

2. 國內外離岸風力機標準現況及關係

為釐清國內外離岸風力機標準之關係，本章針對離岸風力機國際標準IEC 61400-3-1、DNV-ST-0437及國內標準CNS 15176-3的版本制定及其現況進行探討。

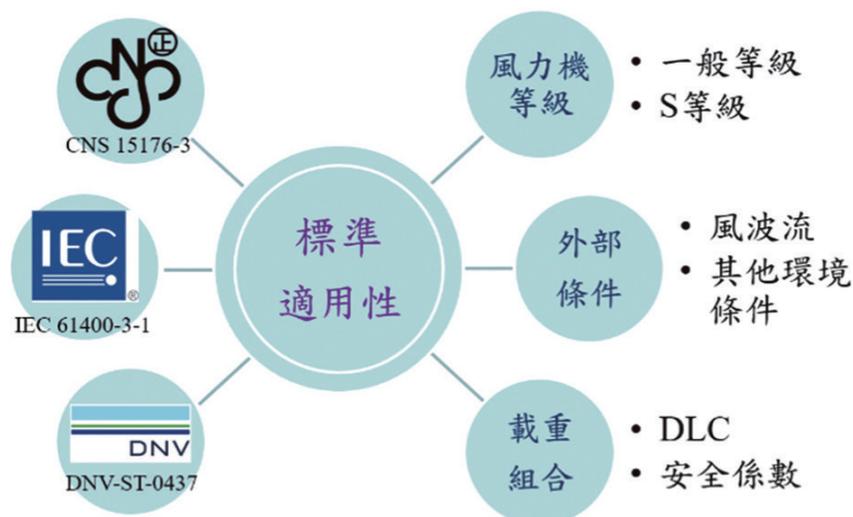


圖2 離岸風力機標準適用性探討

2.1 國際標準IEC 61400-3-1

對於離岸風力機標準，國際電工委員會(IEC)於2009年2月制定IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02) Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines (IEC, 2009)，2019年4月則將離岸風力機標準分成固定式和浮動式離岸風力機兩部分，分別制定新版的IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04) Wind energy generation systems - Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines (IEC, 2019b)和IEC 61400-3-2 (Edition 1.0 2019-04) Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines (IEC, 2019c)兩部離岸風力機標準以取代IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02)離岸風力機標準。IEC 61400-3-1固定式離岸風力機標準和IEC 61400-3-2浮動式離岸風力機標準跟IEC 61400-3離岸風力機標準一樣，許多規定內容均參考IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02) Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements (IEC, 2019a)，而新版的IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02)是由IEC 61400-1 (Edition 3.0 2005-08) Wind turbines - Part 1: Design requirements (IEC, 2005)改版而來。

2.2 國際標準DNV-ST-0437

DNV (Det Norske Veritas挪威船級社)是全球知名的第三方驗證機構，提供驗證、評估和訓練服務，最初成立於1864年。直至2013年，DNV與來自德國的德國驗船協會(Germanischer Lloyd, GL)合併成DNVGL，而於2021年3月則又更名為DNV，相關出版之技術標準陸續修改DNVGL用詞為DNV。DNV-ST-0437 (Edition November 2021) Loads and site conditions for wind turbines是DNV針對離岸風

力機載重和場址條件訂定的標準，由DNVGL-ST-0437 (Edition November 2016) Loads and site conditions for wind turbines更名而來，主要技術規範內容未作更改，其內容參考了相關的國際標準(包括IEC、ISO等)和DNV自有標準等，主要參考標準有IEC 61400-1和IEC 61400-3等。

2.3 國內標準CNS 15176-3

國內風力機標準CNS 15176-1 (修訂2018-10)風力機-第1部：設計要求，英文名稱：Wind turbines - Part 1: Design requirements(經濟部標準檢驗局，2018)，係依據2005年發行之IEC 61400-1 (Edition 3.0 2005-08)之主要技術內容，但同時亦參考並加入我國特殊環境條件所適用之相關技術內容，修定成為中華民國國家標準。此標準適用於風力機之基本設計要求，以確保風力機之結構完整性。其目的乃為在設計壽命期間內提供適當之保護水準，以防止所有危險所造成之損壞。此標準與風力機之所有次系統有關，例如控制與保護機構、內部電力系統、機械系統及支撐結構，此標準適用於所有尺寸之風力機。

國內離岸風電的發展相較於國際間應用較慢，於2019年6月才制定公布CNS 15176-3 (制定2019-06)風力機 - 第3部：離岸風力機設計要求，英文名稱：Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines(經濟部標準檢驗局，2019)，係依據2009年發行之IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02)之內容，制定成為中華民國國家標準。此標準適用於評估離岸風力機場址外部條件之額外要求，同時適用於重要設計要求，以確保離岸風力機之結構完整性；標準之目的為在計畫之設計壽命期間內提供適當之保護水準，以防止所有危險所造成之損壞；標準之重點為離岸風力機結構組件之結構完整性，但亦涉及次系統，如控制與保護機

制、內部電力系統及機械系統等。

因CNS 15176-3 (制定2019-06)係依據2009年發行之IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02)之內容制定而成，故相對於2019年4月IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)和IEC 61400-3-2 (Edition 1.0 2019-04)兩部離岸風力機標準內容較舊。

由以上介紹整理離岸風力機的標準現況及關係，如圖3所示。國內離岸風力機標準使用CNS 15176-3 (制定2019-06)和CNS 15176-1 (修訂2018-10)；國際主要使用IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)固定式離岸風力機標準、IEC 61400-3-2 (Edition 1.0 2019-04)浮動式離岸風力機標準、IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02)和DNV-ST-0437 (Edition November 2021)；目前國內標準CNS均係依據舊版IEC如IEC 61400-1 (Edition 3.0 2005-08)及IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02)而訂定，故須加快速度跟上國際標準的應用，同時考慮我國特殊環境條件所適用之相關技術內容，檢視考量本土環境的離岸風力機標準的相關適用性。

3. 風力機等級

本章分析國內外離岸風力機標準之風力機

等級差異及比較，以探討國際離岸風力機標準與國內標準之差異。

CNS 15176-3 (制定2019-06)的離岸風力機等級劃分係直接引用CNS 15176-1 (修訂2018-10)的定義，除用於定義風力機等級之風速及紊流強度外，亦需其他重要參數(如風況、其他環境條件和電網條件)；在CNS 15176-3 (制定2019-06)中則須額外考慮海洋條件，如波浪及海流等，以用於完整描述使用於離岸風力機設計之外部條件。

CNS 15176-1 (修訂2018-10)之風力機等級基本參數如表1所示。風力機等級係以風速及紊流參數定義，分級之用意在於涵蓋大多數之用途及場址條件。風速與紊流參數之值旨在表現不同之場址，而非提供任何特定場址之精確描述。風力機分級可提供以風速與紊流參數明確定義之強健程度。風力機等級以基準風速 V_{ref} 、I至III級之平均風速 V_{ave} 與A至C級之紊流強度 I_{ref} 並用。對於不同於溫帶風場氣候而可能發生極高風速之地區，可使用之風力機等級中加入T級(Tropical Class)基準風速 $V_{ref, T}$ 條件，此條件為可能發生於熱帶地區之颶風、氣旋或颱風。但建議個別風場選用風力機時，仍應依個別風場條件予以考量，如在易受颱風、氣旋及颶風



圖3 國內外離岸風力機標準現況及關係(本研究繪製)

表1 CNS 15176-1風力機等級之基本參數(經濟部標準檢驗局，2018)

| 風力機等級 | I | II | III | S |
|-------------------|------|------|------|--------------|
| V_{ref} (m/s) | 50 | 42.5 | 37.5 | 由設計者 規定之值 |
| V_{ave} (m/s) | 10 | 8.5 | 7.5 | |
| $V_{ref,T}$ (m/s) | 57 | | | |
| A $I_{ref}(-)$ | 0.16 | | | |
| B $I_{ref}(-)$ | 0.14 | | | |
| C $I_{ref}(-)$ | 0.12 | | | |

侵襲地區，應以適合方法評估極端風速。

另一個風力機等級S級為針對設計者及/或客戶要求特殊風況或其他外部條件或特殊安全等級時所定義。S級風力機之設計值應由設計者選擇，並將其載明於設計報告中。有關此等特殊設計，設計條件中所選擇之數值應至少可反映出風力機使用之環境中可預期之嚴苛狀況。第I級、第II級及第III級風力機之設計年限應至少為20年。在S級風力機之情況下，製造商應在設計報告中說明所使用之模型與設計參數值。

IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)離岸風力機等級的劃分係直接引用IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02)的定義，如表2所示。IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02)相較與CNS 15176-

1 (修訂2018-10)離岸風力機等級的劃分，紊流特徵類別由原來的A、B、C三個類別額外增加了一項A+ (非常高紊流特徵類別，其值為0.18)。可知CNS 15176-1 (修訂2018-10)對離岸風力機等級的劃分較舊；IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02)對離岸風力機等級的劃分較新，新增紊流特徵類別A+，對紊流參數定義更完善，以利表現不同之場地的特性。

DNV-ST-0437 (Edition November 2021)直接將風力機分為陸域風力機及離岸風力機兩大部分進行參數的定義，如表3所示。DNV-ST-0437 (Edition November 2021)對離岸風力機等級之定義跟CNS 15176-1 (修訂2018-10)及IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02)的定義不同，DNV-ST-0437 (Edition November 2021)沒有對 $V_{ref,T}$ 值的定義，

表2 IEC 61400-1風力機等級之基本參數(IEC, 2019a)

| Wind turbine class | I | II | III | S |
|--------------------|------|------|------|---|
| V_{ref} (m/s) | 50 | 42.5 | 37.5 | Values specified by the designer |
| V_{ave} (m/s) | 10 | 8.5 | 7.5 | |
| $V_{ref,T}$ (m/s) | 57 | 57 | 57 | |
| A+ $I_{ref}(-)$ | 0.18 | | | |
| A $I_{ref}(-)$ | 0.16 | | | |
| B $I_{ref}(-)$ | 0.14 | | | |
| C $I_{ref}(-)$ | 0.12 | | | |

表3 DNV-ST-0437風力機等級之基本參數(DNV, 2021)

| Wind turbine class | | I | II | III | S |
|--------------------|---------------|-------|------|------|--|
| V_{ref} [m/s] | | 50 | 42.5 | 37.5 | Values to be specified by the manufacturer |
| V_{ave} [m/s] | | 10 | 8.5 | 7.5 | |
| OA | H_{ref} [m] | 10 | | | |
| | T_{ref} [s] | 12.5 | | | |
| | I_{ref} | 0.14 | | | |
| | t_a [m/s] | 10 | | | |
| | t_b | 0.566 | | | |
| | A_c [m] | 0.018 | | | |
| OB | H_{ref} [m] | 6 | | | |
| | T_{ref} [s] | 10 | | | |
| | I_{ref} | 0.12 | | | |
| | t_a [m/s] | 10.5 | | | |
| | t_b | 0.561 | | | |
| | A_c [m] | 0.014 | | | |
| OC | H_{ref} [m] | 2 | | | |
| | T_{ref} [s] | 5.5 | | | |
| | I_{ref} | 0.10 | | | |
| | t_a [m/s] | 11 | | | |
| | t_b | 0.556 | | | |
| | A_c [m] | 0.011 | | | |

但針對紊流強度及波浪參數訂定離岸風力機等級OA、OB、OC，這些參數包括50年再現期有效參考波高 H_{ref} 、對應 H_{ref} 的波週期 T_{ref} 、15 m/s時紊流強度之期望值 I_{ref} 、紊流補償因子 t_a 、紊流形狀因子 t_b 、Charnock常數 A_c ，對波浪參數進行明確的定義(DNV, 2021)，特別是紊流強度之期望值與其他標準都有所不同。

綜合上述，整理CNS 15176-3 (制定2019-06)、IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及DNV-ST-0437 (Edition November 2021)之離岸風力機等級劃分的差異性，如表4所示。建議CNS

15176-3未來改版，可評估紊流特徵數值之訂定是否足以表現本土風況特性，並考慮是否透過紊流強度及波浪參數另行訂定離岸風力機等級，使標準更適用臺灣本土環境條件。

4. 安全係數

風力機應依照以下2種安全等級之一進行設計：1. 當故障導致人員傷亡或其他社會或經濟後果之風險時所適用之一般安全等級。2. 當安全規定係由當地主管機關及/或由製造商與客

表4 各風力機標準離岸風力機等級劃分的差異性

| | CNS 15176-3 (參考基準) | IEC 61400-3-1 | DNV-ST-0437 |
|-------|--|---|---|
| 風力機等級 | A $I_{ref} = 0.16$ B $I_{ref} = 0.14$ C $I_{ref} = 0.12$ $V_{ref,T} = 57 \text{ m/s}$ | 有A+， $I_{ref} = 0.18$ $V_{ref,T} = 57 \text{ /s}$ | 針對 I_{ref} 及波浪參數另行定義 無 $V_{ref,T}$ |

戶共同協議時所適用之特殊安全等級。一般安全等級風力機所適用之部分安全係數，依據風力機標準規定。特殊安全等級風力機(S級風力機)所適用之部分安全係數，得由業主訂定並經主管機關審查認可。

部分安全係數代表載重與材料上之不確定性與變異性、分析方法之不確定性及關於故障後果之結構元件之重要性。部分安全係數主要包括載重部分安全係數 γ_f 、材料部分安全係數 γ_m 及破壞後果部分安全係數 γ_n 。載重部分安全係數為設計載重狀況會使用到的安全係數，其值直接影響設計載重狀況計算結果，故本研究主要針對載重部分安全係數進行解析。

CNS 15176-3 (制定2019-06)極限強度分析

之載重部分安全係數應至少為CNS 15176-1所指定之值，其值如表5所示，可明顯減輕總載重反應之預拉力與重力載重視為有利載重，反之其他載重則視為不利載重。IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)載重部分安全係數參照IEC 61400-1 (Edition 4.0 2019-02)，如表6所示。DNV-ST-0437 (Edition November 2021)載重部分安全係數如表7所示。

比對CNS 15176-3 (制定2019-06)、IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及DNV-ST-0437 (Edition November 2021)之載重部分安全係數的差異性，經整理如表8所示。IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及DNV-ST-0437 (Edition November 2021)均已去除在DLC 8.1中所使用的

表5 CNS 15176-3載重部分安全係數(經濟部標準檢驗局，2019)

| 不利載重 | | | 有利載重 |
|--------|-------|----------|--------|
| 設計狀況種類 | | | |
| 正常(N) | 異常(A) | 運輸與豎立(T) | 所有設計狀況 |
| 1.35 | 1.1 | 1.5 | 0.9 |

上表中使用之縮寫如下：

N: 正常(Normal)，A: 異常(Abnormal)，T: 運輸與豎立(Transport and Erection)

表6 IEC 61400-3-1載重部分安全係數(IEC, 2019b)

| Unfavourable loads | | Favourable loads |
|--------------------------|--------------|-----------------------|
| Type of design situation | | All design situations |
| Normal (N) | Abnormal (A) | |
| 1.35 | 1.1 | 0.9 |

表7 DNV-ST-0437載重部分安全係數(DNV, 2021)

| Functional and environmental loads | | | | | Permanent loads | | |
|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------------|---------------|---------------|
| ULS | | FLS | ALS | SLS | ULS | | FLS, ALS, SLS |
| Normal | Abnormal | | | | Favou-rable | Unfavou-rable | |
| N 1.35 | A 1.1 | F 1.0 | F 1.0 | F 1.0 | 0.9 | 1.1 | 1.0 |

上表中使用之縮寫如下：

ULS: 極端限度狀態(Ultimate Limit States)

FLS: 疲勞限度狀態(Fatigue Limit States)

ALS: 意外限度狀態(Accidental Limit States)

SLS: 使用限度狀態(Serviceability Limit States)

N: 正常(Normal)

A: 異常(Abnormal)

F: 疲勞(Fatigue)

表8 各風力機標準載重部分安全係數的差異性

| | CNS 15176-3 (參考基準) | IEC 61400-3-1 | DNV-ST-0437 |
|--------------|---|--|--|
| 載重部分 安全係數 | 運輸與豎立 $\gamma_f = 1.5$ 有利載重 $\gamma_f = 0.9$ | 無 $\gamma_f = 1.5$ 有利載重 $\gamma_f = 0.9$ DLC 2.1之 $\gamma_f = 1.35 \sim 1.1$ | 無 $\gamma_f = 1.5$ 永久載重 (有利載重 $\gamma_f = 0.9$; 有採取適當措施的載重 $\gamma_f = 1$; 不利載重 $\gamma_f = 1.1$ 。) |

運輸與豎立(T)載重部分安全係數1.5，改為正常(N)載重部分安全係數1.35，放寬了DLC 8.1中製造廠商應說明離岸風力機之運輸、廠址組裝、進出、維護及修理作業中假設之所有風況、海洋條件於設計狀況下使用之安全係數的要求，給廠商更大的自主作業空間。

5. 設計載重狀況

離岸風力機國際標準IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437並非針對臺灣本土環境條件所制定的標準，而臺灣位於颱風及地震多發生的地區，勢必要透過不同的載重組合及情境，額外進行颱風及地震影響評估，以檢視其設計載重的適用性，增進離岸風力機的運轉安全及結構完整性。國內離岸風力機標準CNS 15176-3中雖有

颱風情境設計載重狀況，但內容多為引用國際標準IEC 61400-3而來，有必要探討其颱風情境的設計載重狀況是否適用國內本土環境。因此，有必要先進行國際IEC、DNV及國內CNS等離岸風力機標準差異性比對，探討其適用性。

有關技術標準的設計載重及其組合，離岸風力機之設計要求可用涵蓋離岸風力機可能承受不同設計載重狀況之設計情境來表現。載重狀況應由離岸風力機於場址之發電運轉行為及諸如特定組裝、豎立或維護狀況等其他設計狀況，配合外部條件來決定。而具合理發生機率之所有相關載重狀況，應與風力機控制及保護系統之行為一併考慮。

因篇幅關係，本研究不詳列各風力機標準之設計載重狀況。CNS 15176-3 (制定2019-

06)之設計載重狀況參考IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02)之設計載重狀況，目前IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02)已改版為IEC 61400-3-1及IEC 61400-3-2。DNV-ST-0437 (Edition November 2021)與IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)因版本年份較為接近，其設計載重狀況內容相近，但DNV-ST-0437 (Edition November 2021)是由DNV訂定，其為挪威的公司，考慮歐洲地方環境條件，在設計載重狀況中則多考慮冰雪、冰層等環境影響因素。

CNS 15176-3 (制定2019-06)、IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及DNV-ST-0437 (Edition November 2021)之設計載重狀況差異性比較如表9所示，三個標準只有設計狀況3 (啟動)

到5 (緊急停機)的設計載重狀況一樣。在CNS 15176-3的部分設計載重狀況中，波浪狀況可選用正常海況(NSS)或正常波高(NWH)，但IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437的設計載重狀況中已不考慮波浪正常波高(NWH)狀況。

在DLC 1中，IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437相較於CNS 15176-3主要差異在同時刪除DLC 1.6b，去除決定性設計嚴苛波高(Severe Wave Height, SWH)的設計載重狀況。DNV-ST-0437 (Edition November 2021)考慮寒冷環境條件，在設計載重狀況中會多考慮冰雪、冰層等環境影響因素，增加DLC 1.7及DLC 6.5之結冰狀況。在DLC 2中，相較於CNS 15176-3，IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437新增低電壓穿越DLC 2.5。

表9 各風力機標準設計載重狀況的差異性

| CNS 15176-3 (參考基準) | IEC 61400-3-1 | DNV-ST-0437 |
|-----------------------|--|---|
| DLC 1 | 刪除1.6b (決定性設計嚴苛波高SWH) | 刪除1.6b (決定性設計嚴苛波高SWH) 增加1.7 (結冰) |
| DLC 2 | 新增2.5(低電壓穿越) | 提出2.3另外方案供選擇 新增2.5 (低電壓穿越) |
| DLC 3 | 同CNS 15176-3 | |
| DLC 4 | | |
| DLC 5 | | |
| DLC 6 | 刪除6.1b, 6.1c, 6.2b, 6.3b 6.4 風況參數修正 | 刪除6.1b, 6.1c, 6.2b, 6.3b 6.4 風況參數修正 增加 6.5 (結構上的結冰) |
| DLC 7 | 刪除7.1b, 7.1c 7.2 風況參數修正 | 刪除7.1b, 7.1c 7.2 風況參數修正 |
| DLC 8 | 刪除8.2b, 8.2c 新增8.4 | 刪除8.2b, 8.2c 新增8.4~8.6 (多考慮了運維船舶衝撞和直升機載重-正常事件，支援船舶衝撞-異常事件) |

在DLC 6~8中，IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437相較於CNS 15176-3主要差異在刪除包括穩定風速模型的所有設計載重狀況；計算輪載高度之平均風速 V_{hub} 之值時去除形狀係數 k_1 因子影響；計算示性波高 H_s 之值時去除接觸係數 k_2 因子影響。

CNS 15176-3 (制定2019-06)、IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及DNV-ST-0437 (Edition November 2021)之紊流與穩流設計情形如表10所示，不同標準間之紊流與穩定風速模型設計狀況之差異主要在DLC 6.x和DLC 7.x。DLC 8設計載重計算因不同製造商及不同風力機運輸、組裝、維護及修理之狀態有所不同，無法進行紊流風速模型及穩定風速模型之DLC進行分析比對，故本研究僅針對DLC 6.x及DLC 7.x進行紊流風速模型及穩定風速模型之DLC分析比對。

以核能研究所現有的NREL 5 MW風力機模型為離岸參考風力機，計算並比較離岸參考風力機承受紊流與穩定風速之極限載重結果，如圖4與圖5所示。根據零組件上的載重比較結果，紊流與穩定風速模型兩種風況模型所計算

出的載重大小差異小。但紊流風速模型較能接近自然情況下的風速變化狀況，同時可以減少設計評估時的計算案例，故目前IEC 61400-3-1最新版(2019)，經改版僅保留紊流風速模型，DNV-ST-0437 亦無穩定風速模型之設計載重狀況。

6. 地 震

CNS 15176-3 (制定2019-06)僅說明地震載重應依CNS 15176-1所述之規定進行評估，並無地震之DLC規定。同樣的，IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)亦僅說明地震載重應依IEC 61400-1所述之規定進行評估，並無地震之DLC規定。但DNV-ST-0437 (Edition November 2021)有針對地震規定其DLC。整理CNS 15176-3 (制定2019-06)、IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及DNV-ST-0437 (Edition November 2021)之地震設計載重狀況的差異性比較，如表11所示。

DNV-ST-0437 (Edition November 2021)地震設計載重狀況DLC 11.1~11.3如表12所示。DLC

表10 離岸風力機標準之紊流與穩流設計情形

| 標準 | 紊流風速模型 | 穩定風速模型 |
|-----------------------------------|----------|----------------------|
| CNS 15176-3 | DLC 6.1a | DLC 6.1b DLC 6.1c |
| | DLC 6.2a | DLC 6.2b |
| | DLC 6.3a | DLC 6.3b |
| | DLC 7.1a | DLC 7.1b DLC 7.1c |
| IEC 61400-3-1 及 DNV-ST-0437 | DLC 6.1 | N/A |
| | DLC 6.2 | N/A |
| | DLC 6.3 | N/A |
| | DLC 7.1 | N/A |

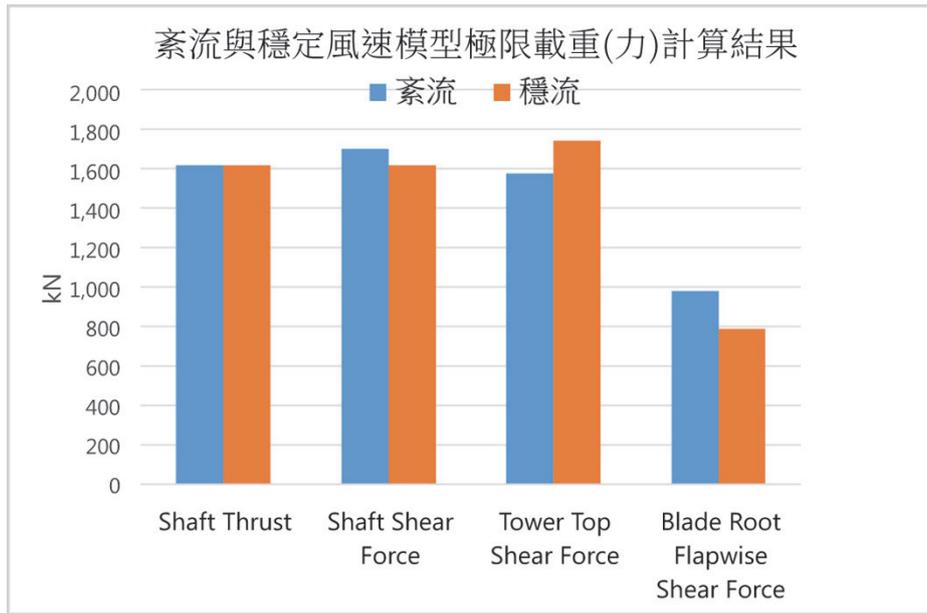


圖4 紊流與穩定風速模型之極限載重(力)結果

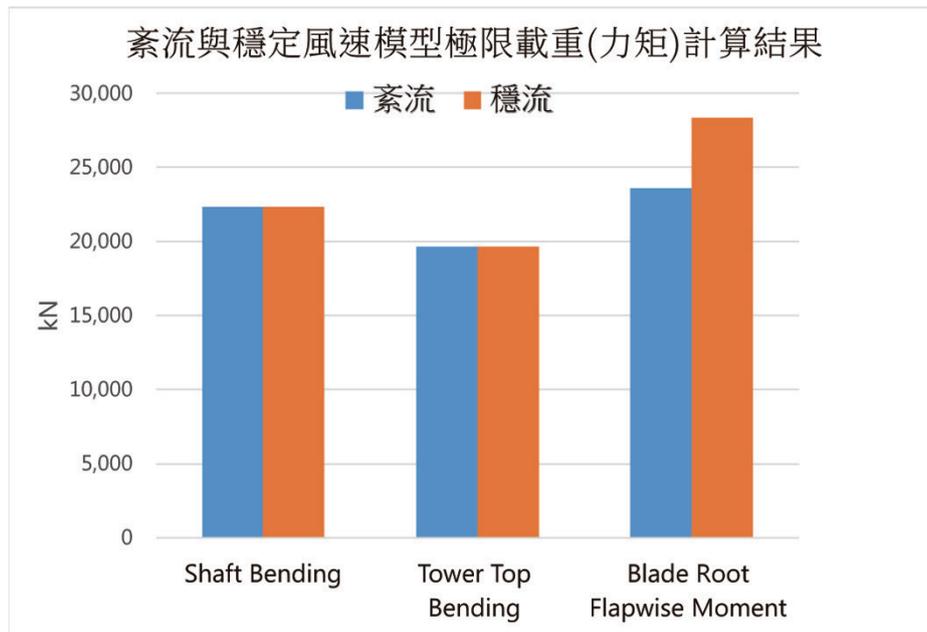


圖5 紊流與穩定風速模型之極限載重(力矩)結果

表11 各風力機標準地震設計載重狀況差異性

| | CNS 15176-3 (參考基準) | IEC 61400-3-1 | DNV-ST-0437 |
|----|-----------------------|---------------|---------------|
| 地震 | 無DLC | 無DLC | DLC 11.1~11.3 |

表12 DNV-ST-0437地震設計載重狀況(DNV, 2021)

| 設計狀況 | DLC | 風況 | 波浪 | 風與波浪方向 | 海流 | 水位 | 其他條件 | 分析種類 | 部分安全係數 |
|-----------------|------|-------------------------------------|------------------|-----------|-----|--------|---------|------|--------|
| 發電 | 11.1 | NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ | $H = H_s$ (V) | 同向, 單向 | NCM | 正常水位範圍 | | U | 1.0 |
| 發電 | 11.2 | NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ | $H = H_s$ (V) | 同向, 單向 | NCM | 正常水位範圍 | 地震及電網損失 | U | 1.0 |
| 待機 (待機狀況或惰轉) | 11.3 | NWP $V_{hub} = V_1$ | $H = H_s$ (V) | 同向, 單向 | NCM | 正常水位範圍 | 地震及電網損失 | U | 1.0 |

11.1到DLC 11.3定義了地震活動區域要考慮的動態載重情況。DLC 11.1假設在正常發電期間發生地震；DLC 11.2假設在正常發電期間發生地震及電網損失的狀況；DLC 11.3考慮在待機或惰轉情況下發生地震及電網損失的狀況。

本研究使用美國再生能源實驗室(NREL)所開發的風力機動態載重計算程式FAST，透過此軟體以整合轉子氣彈力學、流體力學、控制系統和機構動力學，進行時間序列的求解，其計算能力及精度也已通過認證單位如DNV的認可。離岸參考風力機模型為核研所現有之NREL 5 MW風力機，由於FAST無法建立套筒式(Jacket-type)模型，支撐結構部分則是將30米水深的套筒式(Jacket-type)支撐結構等效為圓柱型單樁式支撐結構(Monopile)，如圖6所示。風況條件參考IEC 61400-3-1之Class IA風況(IEC, 2019b)，模擬風速範圍由3 m/s至25 m/s，解析度為2 m/s。海象條件使用本土化的統計參數，資料是蒐集臺灣本土的新竹外埔潮位站，以及新竹資料浮標(編號46757B)，浮標位置離岸約3.5 km、水深24.5 m處，距離竹南離岸風力示範區約2~5 km，量測得到的數據資料時間為101年10月~103年9月共兩年。地震條件參考台電公司離岸風力發電第一期計畫可行性研究(台灣電力公司，2015)資料及內政部針對陸上構造物

之建築物耐震設計規範及解說(內政部營建署，2011)，離岸風力機工址係數之震區短週期設計水平譜加速度係數、震區一秒週期設計水平譜加速度係數、震區短週期最大水平譜加速度係數、震區一秒週期最大水平譜加速度係數等係數分別為0.7、0.4、0.9及0.5。離岸風力機設計基準地震以475年迴歸期地震為標的，配合以上工址參數，可求得其工址之反應譜，並將反應譜轉換成三方向人造地震波，其最大地震加速度(Peak Ground Acceleration)為0.31 g。結合以上相關環境參數計算出風力機在各個狀態下的載重情形。

以套筒式(Jacket-type)支撐結構的離岸參考風力機進行有無考慮地震力的DLC計算，針對等效為圓柱型單樁式支撐結構(Monopile)的塔頂(Tower top)、連接段(Transition piece)、泥線(Mudline)之極限載重(力及力矩)進行結果比較，以上結果皆未考慮安全係數，結果輸出座標系統如圖7所示。

在CNS 15176-3及DNV-ST-0437之極限載重計算結果，有關支撐結構在x、y、z方向以及x、y合力的最大受力情形(因力及力矩有方向性，故均取絕對值作比較)，如圖8~圖13所示。以上結果顯示在塔頂、連接段和泥線位置上，考慮地震力效應所造成的載重都比沒考慮地震

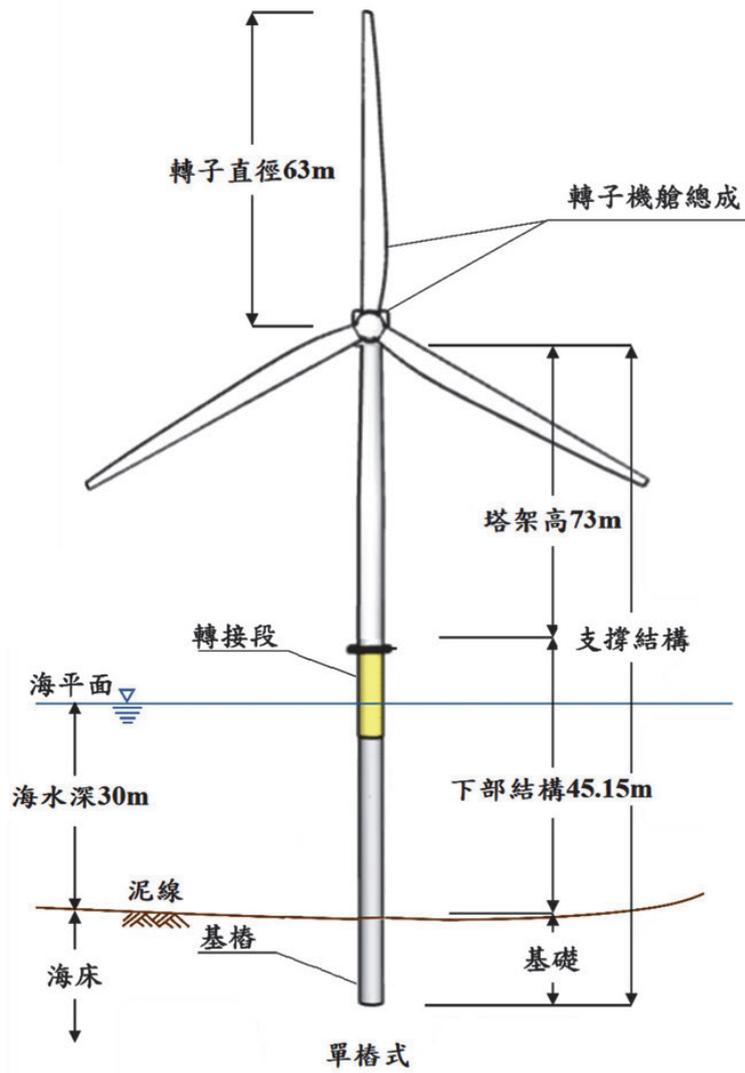


圖6 單樁式風力機模型示意圖

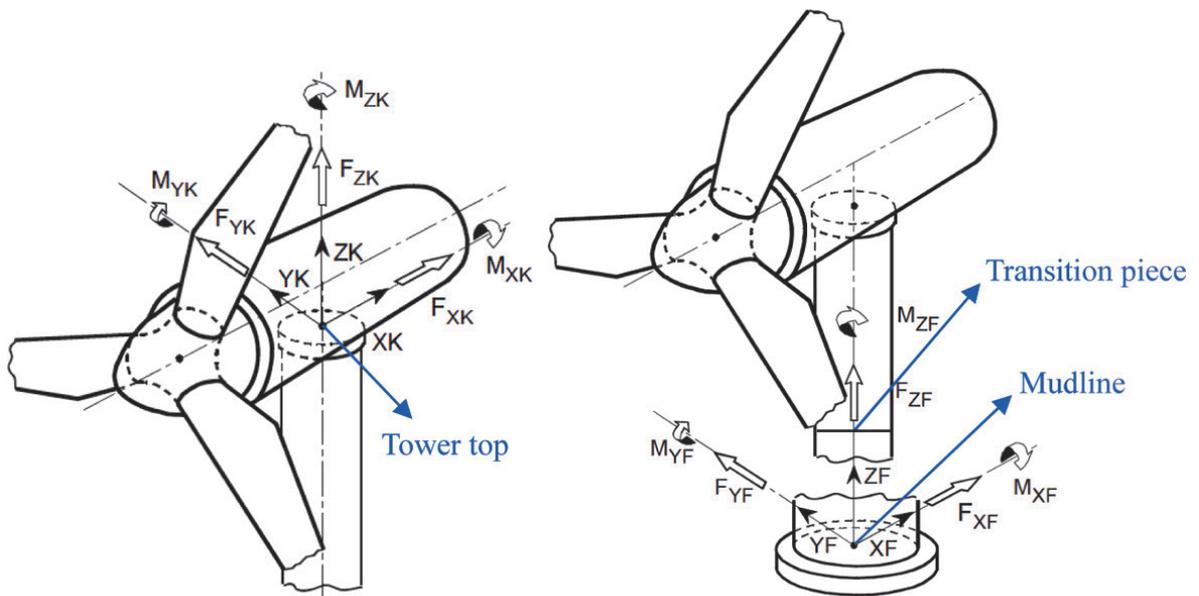


圖7 支撐結構之計算結果座標系統(DNV, 2021)

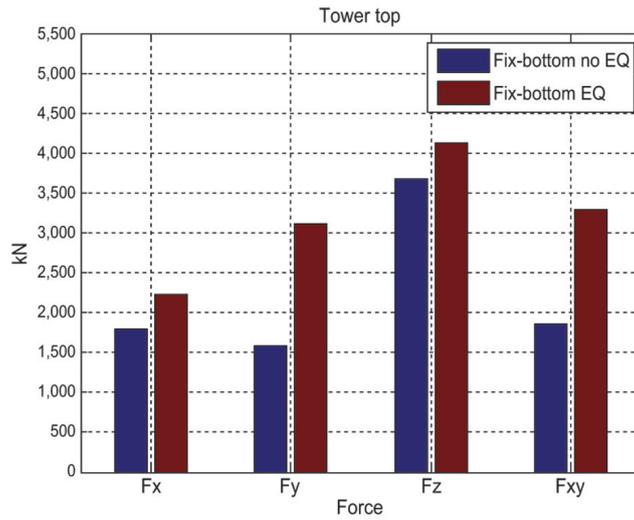


圖8 考慮地震力效應於Tower top之極限載重(Force)比較

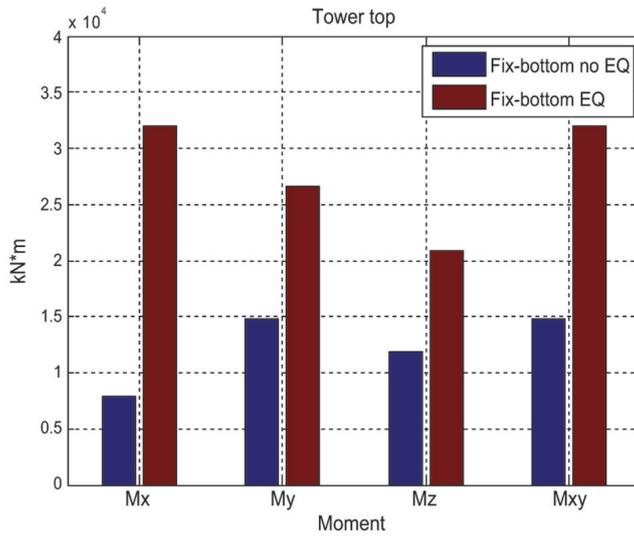


圖9 考慮地震力效應於Tower top之極限載重(Moment)比較

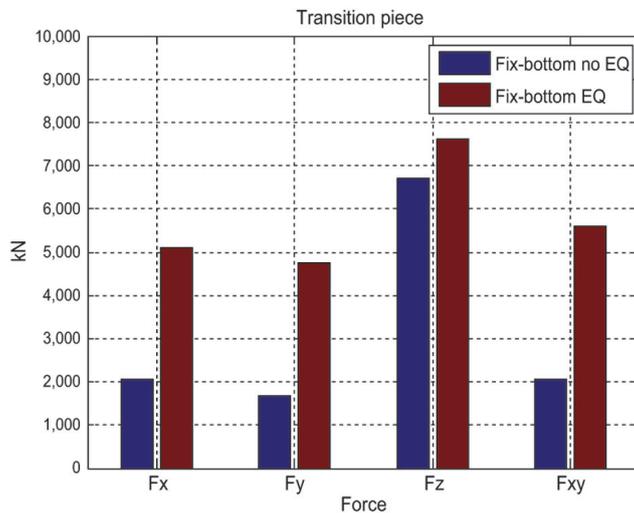


圖10 考慮地震力效應於Transition piece之極限載重(Force)比較

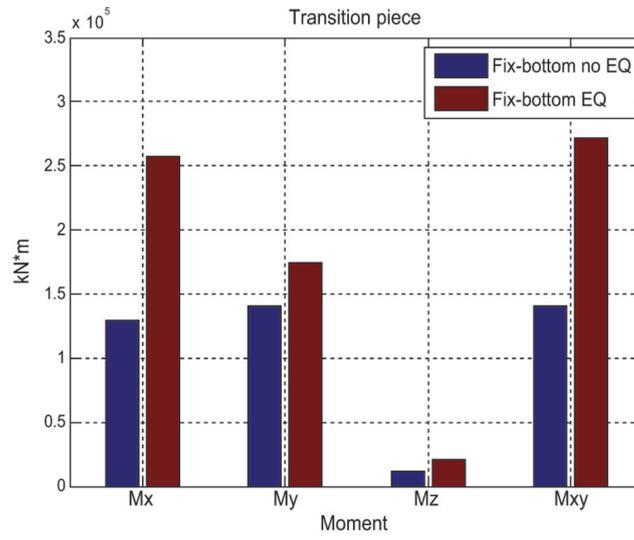


圖11 考慮地震力效應於Transition piece之極限載重(Moment)比較

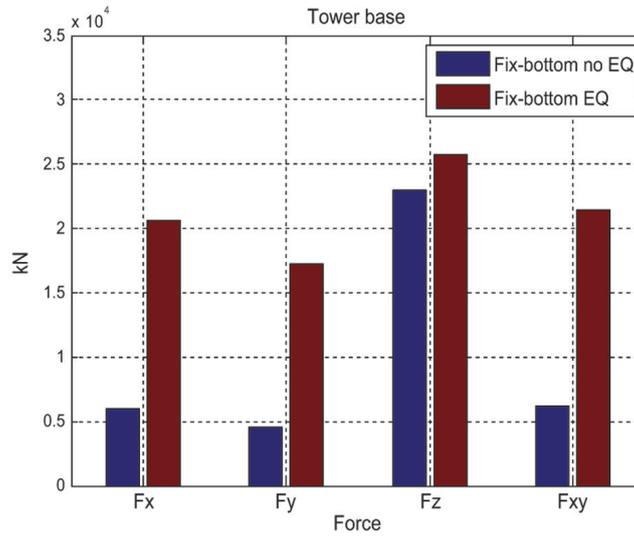


圖12 考慮地震力效應於Mudline之極限載重(Force)比較

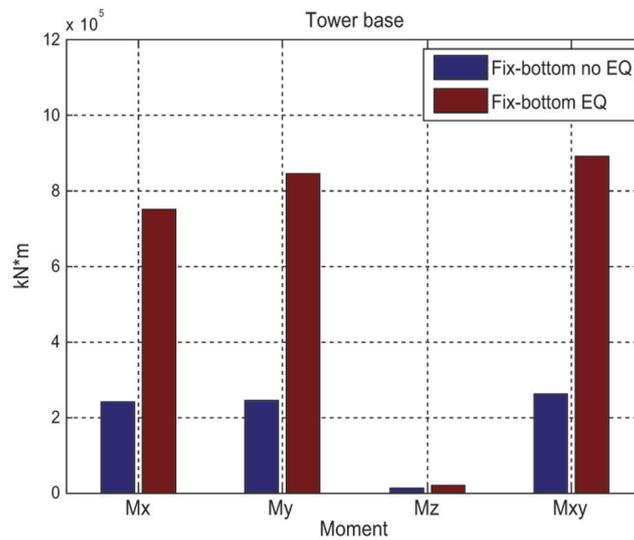


圖13 考慮地震力效應於Mudline之極限載重(Moment)比較

力效應來的大，其中相差最多的為位於塔頂的 x 方向力矩(Mx)，可達4倍之多；亦可發現地震力影響最大的位置是發生在泥線，沿著泥線向上至塔頂，地震所造成的載重就會大幅度降低，因此支撐結構的設計需考量能否承載地震力，尤其是接近泥線的部分，未來可納入靠近離岸風力機示範區的土壤參數，使得風力機整體動態模擬建模更符合臺灣本土的實際現況，提供本土離岸風力機及支撐結構設計開發商一些見解，作為日後設計之考量。

7. 颶 風

對於不同於溫帶風場氣候而可能發生極高風速之地區，IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及CNS 15176-3 (制定2019-06)風力機等級中加入T級基準風速條件，此條件為可能發生

於熱帶地區之颶風、氣旋或颱風。颱風載重之極端風速(EWM)模型使用熱帶環境之極端基準風速 $V_{ref,T}$ 取代 V_{ref} 。DNV-ST-0437 (Edition November 2021)離岸風力機等級中無定義T class風力機，沒有颱風設計載重狀況。整理CNS 15176-3 (制定2019-06)、IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)及DNV-ST-0437 (Edition November 2021)之離岸風力機颱風設計載重狀況的差異性比較，如表13所示。

CNS 15176-3 (制定2019-06)離岸風力機颱風設計載重狀況如表14所示，不考慮 k_1 及 k_2 係數影響下，IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)與CNS 15176-3 (制定2019-06)之颱風設計載重狀況一樣，其極端基準風速 $V_{ref,T}$ 值均為57 m/s。因DNV-ST-0437 (Edition November 2021)無颱風設計載重狀況，本研究引用DNV專為熱帶地區之颶風、氣旋或颱風訂定之GL Tropical

表13 各風力機標準颱風設計載重狀況差異性

| | CNS 15176-3 (參考基準) | IEC 61400-3-1 | DNV-ST-0437 |
|----|---|---|---------------|
| 颶風 | 引用CNS 15176-1，在極端風速(EWM)模型中使用 $V_{ref,T}$ 取代 V_{ref} 。($V_{ref,T} = 57$ m/s) | 引用CNS 61400-1，在極端風速(EWM)模型中使用 $V_{ref,T}$ 取代 V_{ref} 。($V_{ref,T} = 57$ m/s) 附錄I中新增支撐結構颱風DLC，僅適用於支撐結構設計載重需求，且為非強制性。 | 無定義T class風力機 |

表14 CNS 15176-3颱風設計載重狀況(經濟部標準檢驗局，2019)

| 設計狀況 | DLC | 風況 | 波浪 | 風與波浪方向 | 海流 | 水位 | 其他條件 | 分析種類 | 部分安全係數 |
|-----------------|------|--|----------------------------|-----------|------------|------------|----------|------|--------|
| 待機 (待機狀態或惰轉) | 6.1a | EWM 紊流風速 模型 $V_{hub} = k_1 V_{ref,T}$ | ESS $H_s = k_2 H_{s50}$ | 錯位, 多向 | 極端海流 模型 | 極端水位 範圍 | | U | N |
| | 6.2a | EWM 紊流風速 模型 $V_{hub} = k_1 V_{ref,T}$ | ESS $H_s = k_2 H_{s50}$ | 錯位, 多向 | 極端海流 模型 | 極端水位 範圍 | 電網 損失 | U | A |

表15 GL TC Tech. Note 颱風設計載重狀況(DNV, 2013)

| 設計狀況 | DLC | 風況 | 其他條件 | 分析種類 | 部分安全係數 |
|------|------|-----------------------------------|--------------------------|--------|--------|
| 發電 | 11.1 | 30分鐘內 V_{in} 增加到ETCyWM及風向變化180度 | 僅風力機位於熱帶氣旋風眼內並處於發電模式時才適用 | U | N |
| 待機 | 11.2 | | | 電網損失7天 | U |
| | 11.3 | ETCyWM | U | | N |

cyclone Technical Note (GL TC Tech. Note) 「Certification of Wind Turbines for Tropical Cyclone Conditions」的颱風設計載重狀況，如表15所示，表中ETCyWM為熱帶氣旋風況模型 (Extreme Tropical Cyclone Wind Model)縮寫，蒐集臺灣梧棲測站1977年到2015年的最大十分鐘平均風速，依GL TC Tech. Note之規定統計出50年迴歸期的颱風極限參考風速為55.34 m/s。

為探討颱風設計載重之極限強度及影響，以核研所現有NREL 5 MW風力機模型為離岸參考風力機，進行颱風案例計算。探討轉子機艙總成RNA (Rotor Nacelle Assembly)的葉片根部 (Blade root)、低速軸LSS (Lower-speed Shaft, 本

研究以Main shaft為代表)，以及支撐結構塔頂 (Tower top)與支撐結構連接段(Transition-piece)位置上較為重要方向的載重，載重計算結果參考座標如圖7及圖14所示。如圖15~圖22所示，依序列出Blade root、LSS(Main shaft)、Tower top與Transition-piece零組件，不含安全係數與含安全係數的極限載重計算結果，以進行CNS 15176-3 (制定2019-06) [颱風設計載重狀況同 IEC 61400-3-1 (Edition 1.0 2019-04)] 與GL TC Tech. Note之颱風設計載重狀況之極限載重的比對及探討。

如圖15~圖16所示，Blade root較為重要方向上的載重為 F_x (Flapwise)與 M_y (Flapwise)。

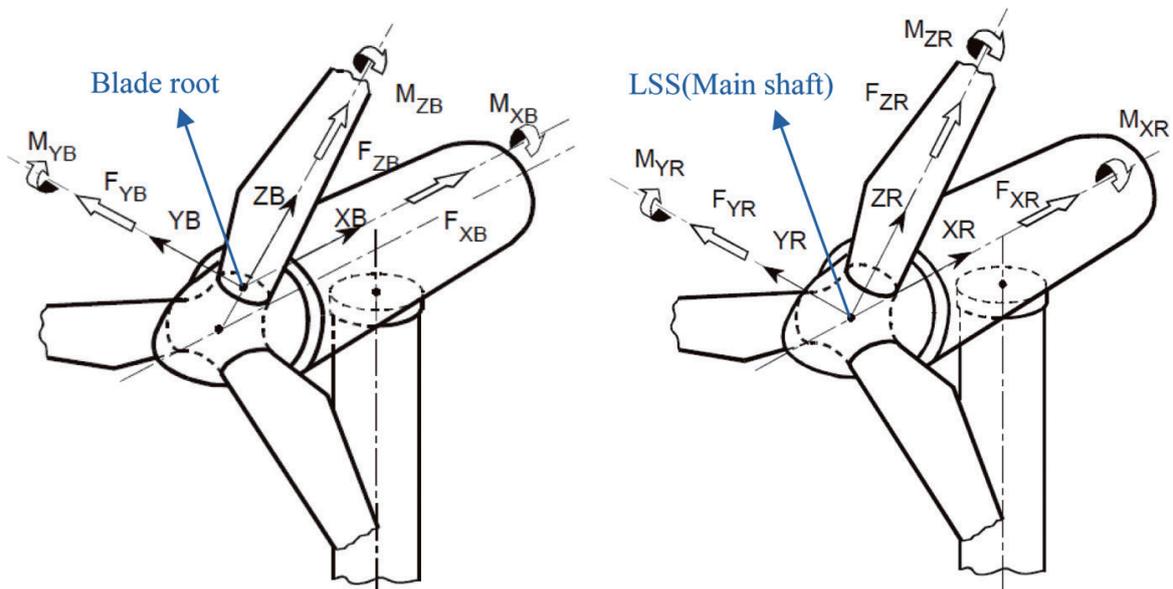


圖14 風力機之計算結果座標系統(DNV, 2021)

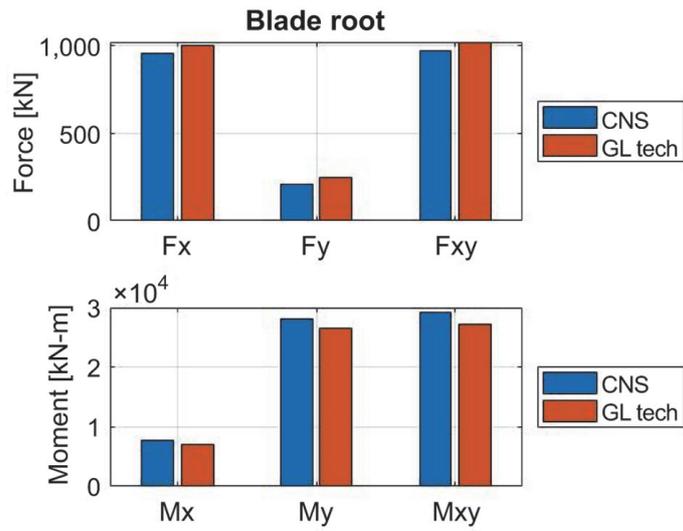


圖15 Blade root極限載重結果比較(無安全係數)

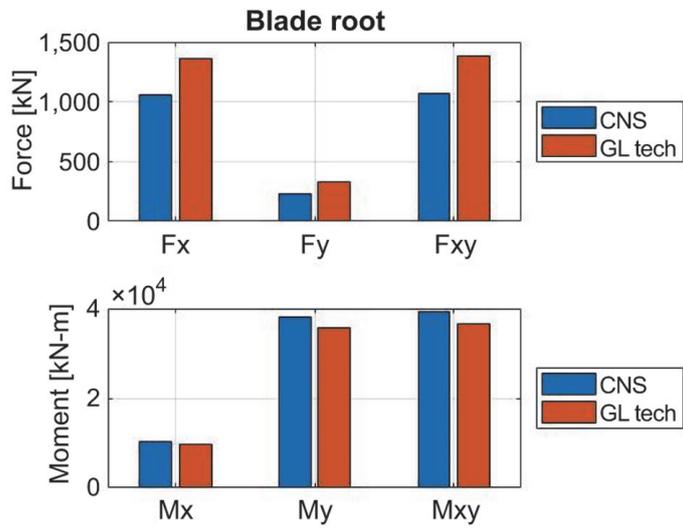


圖16 Blade root極限載重結果比較(含安全係數)

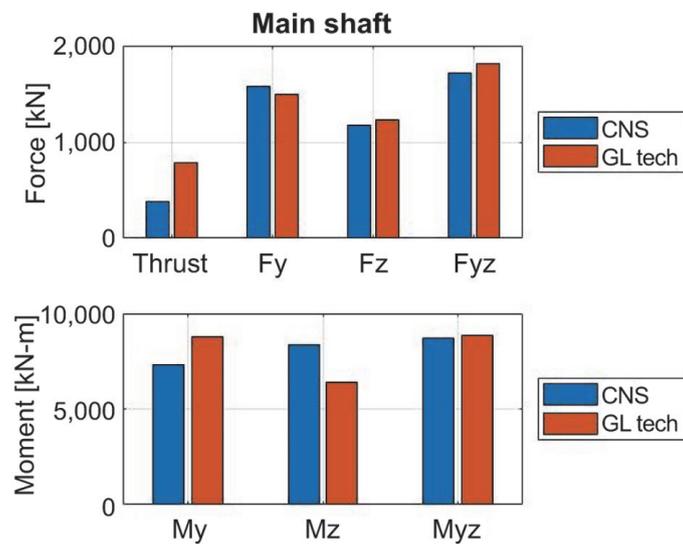


圖17 LSS(Main shaft)極限載重結果比較(無安全係數)

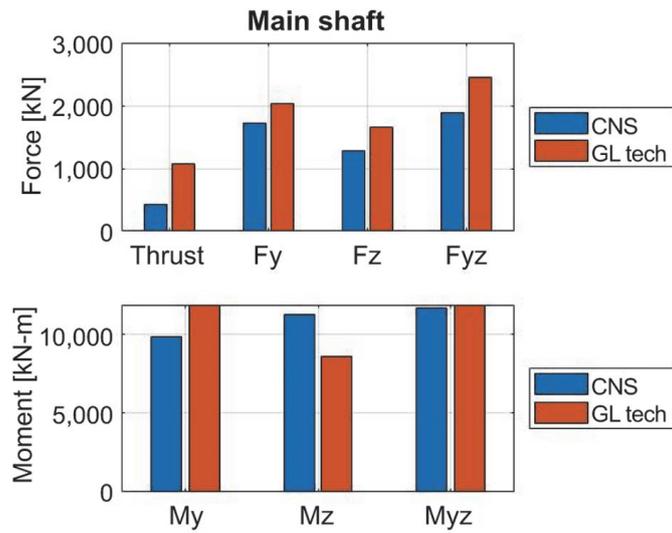


圖18 LSS(Main shaft)極限載重結果比較(含安全係數)

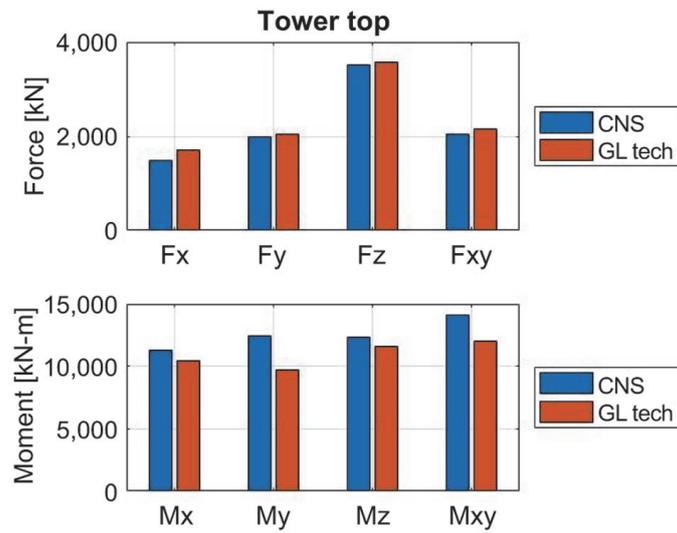


圖19 Tower top極限載重結果比較(無安全係數)

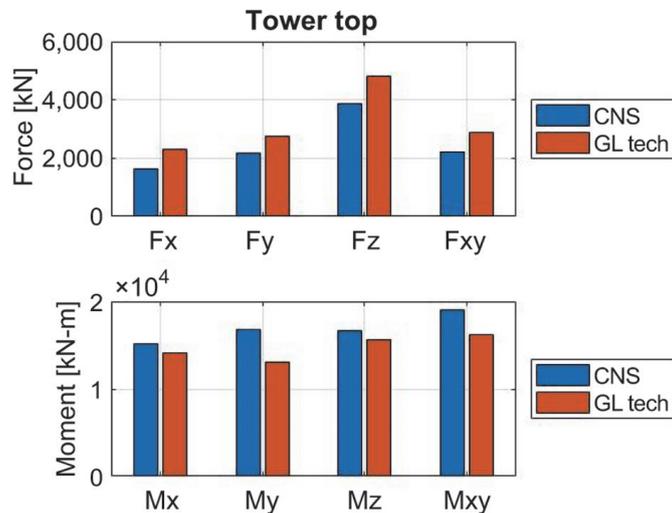


圖20 Tower top極限載重結果比較(含安全係數)

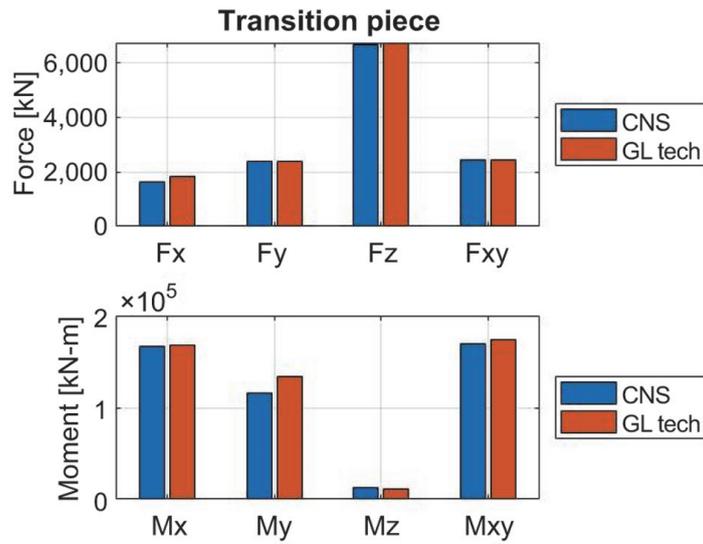


圖21 Transition-piece極限載重結果比較(無安全係數)

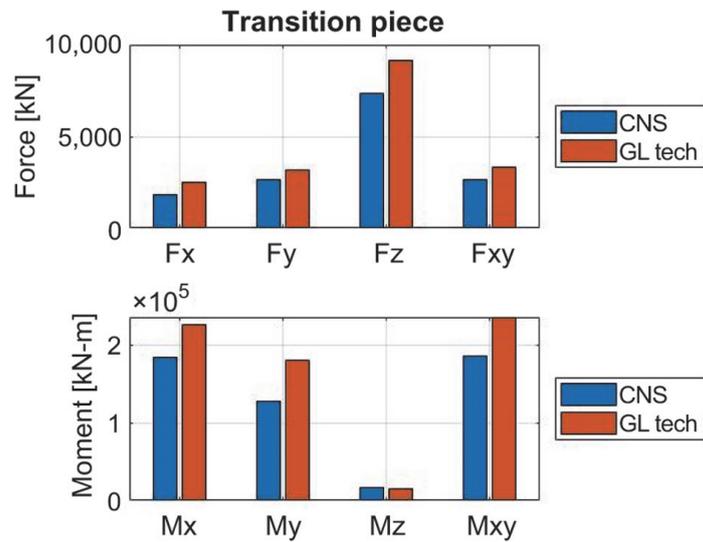


圖22 Transition-piece極限載重結果比較(含安全係數)

不論考慮安全係數與否，GL TC Tech. Note的Fx載重都比較大；CNS 15176-3的My載重都比較大。

如圖17~圖18所示，LSS(Main shaft)較為重要方向上的載重為Thrust (推力)、Fyz (合剪力)與Myz (合力矩)。不論考慮安全係數與否，GL TC Tech. Note的Thrust及Fyz載重都比較大；Myz載重大小沒有明顯的大小差異。

如圖19~圖20所示，Tower top較為重要方向上的載重為Fxy (合剪力)與Mxy (合力矩)。不論考慮安全係數與否，GL TC Tech. Note的Fxy

載重都比較大，但差異不大；CNS 15176-3的Myz載重都比較大。

如圖21~圖22所示，Transition-piece較為重要方向上的載重為Fxy (合剪力)與Mxy (合力矩)。不考慮安全係數時，Fxy與Mxy在GL TC Tech. Note及CNS 15176-3中沒有明顯大小差異。考慮安全係數時，GL TC Tech. Note的Fxy及Mxy載重都比較大。

綜合上述，GL TC Tech. Note與CNS 15176-3之颱風設計載重狀況的極限載重大小差異不大，沒有哪個標準特別的保守。CNS

15176-3之颱風載重極端風速(EWM)模型使用極端基準風速 $V_{ref,T}$ 取代 V_{ref} ，可以運用既有的 DLC 6.1~6.2計算模式，無需針對颱風狀況進行建模作業，可以減少風力機設計評估之時間，並維持一定之保守度及安全性。故CNS 15176-3及IEC 61400-3-1颱風設計載重狀況之訂定具有代表性及參考性。

8. 結 論

臺灣積極開發離岸風電，但目前離岸風力機均為國外進口，其非依國內風力機設計標準進行設計，多數採用IEC或DNV標準進行設計製造。為確保風力機安全，本研究進行國內標準CNS 15176-3、國際標準IEC 61400-3-1及DNV-ST-0437的差異性比對，以探討各風力機標準對國內本土環境之適用性。比較國際及國內標準之風力機等級差異性，並提出國內標準改版需考量之重要參數及方向；解析風力機安全係數差異性，以作為設計載重狀況安全係數使用基礎；進行各標準一般設計載重狀況比較，分析設計載重狀況之紊流與穩流設計情形之不同，並比較其極限載重結果；探討地震動態載重對離岸風力機之影響，可作為國內地震設計載重狀況之參考；分析比較CNS 15176-3及IEC 61400-3-1與GL TC Tech. Note之颱風設計載重狀況之差異，證明CNS 15176-3及IEC 61400-3-1颱風設計載重狀況之訂定具有代表性及參考性。本研究可作為國內本土離岸風力機相關標準制訂之重要參考，以完善國內本土離岸風力機標準。

目前國內標準CNS均係依據舊版IEC (如IEC 61400-1 (Edition 3.0 2005-08)及IEC 61400-3 (Edition 1.0 2009-02))而訂定，故須加快速度引進最新國際標準的應用，並應同時考慮我國特殊環境條件所適用之相關技術內容，檢視考量

本土環境的離岸風力機標準的相關適用性。建議CNS 15176-3未來改版，可評估紊流特徵數值之訂定是否足以表現本土風況特性，並考慮是否透過紊流強度及波浪參數另行訂定離岸風力機等級，使標準更適用臺灣本土環境條件。

根據離岸風力機標準之紊流與穩定風速模型之極限載重結果差異小，紊流風速模型較能接近自然情況下的風速變化狀況，亦可減少設計評估時的計算案例。建議CNS 15176-3未來改版可與IEC 61400-3-1一樣採用此規定。

本文考慮地震力效應於風力機極限載重比較中，可發現地震力影響最大的位置是發生在泥線，沿著泥線向上至塔頂，地震所造成的載重就會大幅度降低。提供本土離岸風力機及支撐結構設計開發商一些見解，作為日後設計之考量，同時建議CNS 15176-3未來改版需納入地震影響之設計載重狀況。

CNS 15176-3及IEC 61400-3-1之颱風設計載重狀況與GL TC Tech. Note之颱風設計載重狀況的極限載重大小差異小，可知其颱風設計載重狀況之訂定具有代表性及參考性。

參考文獻

- 內政部營建署，2011。建築物耐震設計規範及解說。
- 台灣電力公司，2015。離岸風力發電第一期計畫可行性研究。
- 經濟部標準檢驗局，2018。CNS 15176-1風力機－第1部：設計要求，中華民國國家標準。
- 經濟部標準檢驗局，2019。CNS 15176-3 風力機－第3部：離岸風力機設計要求，中華民國國家標準。
- DNV, 2013. Technical Note - Certification of Wind Turbines for Tropical Cyclone Conditions.

- DNV, 2021. DNV-ST-0437 Loads and site conditions for wind turbines.
- GWEC, 2022. GWEC Global wind report 2022.
- IEC, 2005. IEC 61400-1 Wind turbines - Part 1: Design requirements.
- IEC, 2009. IEC 61400-3 Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines.
- IEC, 2019a. IEC 61400-1 Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements.
- IEC, 2019b. IEC 61400-3-1 Wind energy generation systems -Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines.
- IEC, 2019c. IEC 61400-3-2 Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines.
- IEC, 2019a. IEC 61400-1 Wind energy generation

Discussion on the Applicability of Offshore Wind Turbine Standards

Yu-Chu Lin^{1*} Wen-Jeng Lai¹ Chin-Cheng Huang²

ABSTRACT

In order to promote energy transformation and drive the localization of the wind power industry, the government is actively developing offshore wind power technology in Taiwan. The international standards for offshore wind turbines IEC 61400-3-1 and DNV-ST-0437 are not formulated for the local environmental conditions in Taiwan. In this study, the domestic standard CNS 15176-3, the international standard IEC 61400-3-1 and DNV-ST-0437 are compared to explore the applicability of the standard to the domestic local environment. The main research contents are as follows. The current status and relationship analysis of offshore wind turbine international standards IEC 61400-3-1, DNV-ST-0437 and domestic standard CNS 15176-3; The paper compared the differences in wind turbine classes, safety factors and design load cases of various standards and discuss the reasons; This study analyzes the difference between turbulent flow and steady flow design of DLC, and compares its ultimate load results; Calculate the earthquake and typhoon design load conditions of each offshore wind turbine standard, and analyze the influence of its ultimate load on the wind turbine. The paper can be used as an important reference for the formulation of relevant standards for local offshore wind turbines to improve domestic standards.

Keywords: Offshore Wind Turbine, Standards, Applicability.

¹ Assistant Researcher, Mechanical and System Engineering Program, Institute of Nuclear Energy Research.

² Researcher & Director, Mechanical and System Engineering Program, Institute of Nuclear Energy Research.

*Corresponding Author, Phone: +886-3-4711400#3344, E-mail: lincyachu@iner.gov.tw

Received Date: May 13, 2022

Revised Date: July 14, 2022

Accepted Date: August 10, 2022