

# 一般論文

## 洋上風力発電所側にダイオード整流器を用いた 直流送電方式の基礎検討

Fundamental Analysis of HVDC Power Transmission  
Method with Diode Rectifier on Offshore Wind Farm

久保 敏 裕*	黒田 和 宏*
T. Kubo	K. Kuroda
荻原 義 也*	平崎 敬 朗**
Y. Ogihara	N. Hirasaki
長崎 則 久**	
N. Nagasaki	

### 概要

洋上風力発電所で発電された電力を長距離ケーブルで陸上に送電する場合、自励式変換器を用いた直流送電が採用されているが、洋上変換所のコスト低減が大きな課題となっている。解決策として、洋上側プラットフォームにダイオード整流器を、陸上側に自励式変換器を採用する方式が提案されていることを受け、その動作や高調波についての基礎検討を行った。瞬時値シミュレーションにより、本方式で安定した送電が実現できることに加え、洋上集電系のダイオード整流器から発生する高調波の対策として、高調波フィルタ設置の有効性を示した。

### Synopsis

While voltage-sourced converters (VSCs) are used in case of sending power generated from offshore wind farm by long-distance cable, the cost reduction of offshore platform is one of great concern. To solve this problem, a power transmission method using both offshore diode rectifier and onshore VSC have been proposed. In this paper, fundamental examinations of its performance and harmonics are done. Specifically, it is checked by EMT simulation tool that stable power transmission can be done. Also, it is described that the effectness of harmonic filters against harmonics generated by the diode rectifier in offshore system.

### 1. 背景

直流送電で必要となる交直変換器では、半導体スイッチング素子の発達に伴い、自励式変換器の適用が拡大している。特に正弦波に近い電圧を出力できるModular Multilevel Converter (MMC) 方式では、これまで他励式変換器では必須であった高調波フィルタが不要とされている<sup>(1)</sup>。

今後の再生可能エネルギー電源として期待される風力発電は、これまで欧州を中心として洋上ウインドファームの導入が進んできたが、最近では台湾や日本でも導入が検討されている。洋上風力発電では、風車

設置点が陸地から遠方になると直流送電が採用されることが多いが、洋上プラットフォームにMMCのような自励式変換器を採用した場合、その重量・容積・コストが課題となることが報告されている<sup>(2)</sup>。

この解決策として、洋上風力発電は送電方向が陸上への一方向であること、風車発電機は誘導機から電圧源として動作できるインバータで連系する直流リンク方式が主流となったことから、1970～1980年代に提唱された送電側をダイオード整流器とするハイブリッド方式<sup>(3,4)</sup>が改めて注目されている。しかし、その動作特性は、陸上側にサイリスタを適用した他励式HVDC（直流

\* 研究開発本部

\*\* 電力・環境システム事業本部

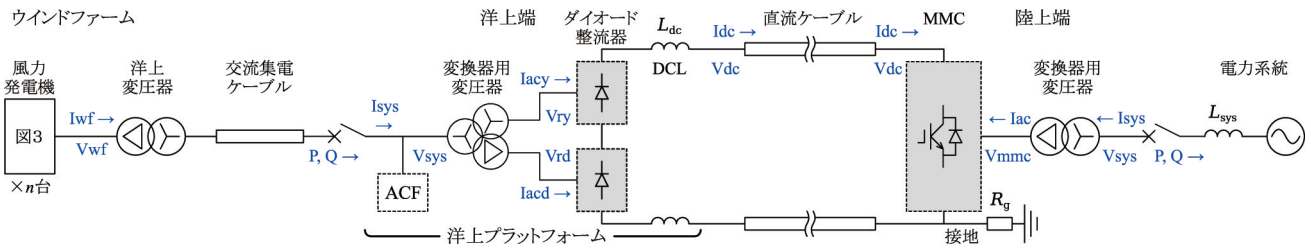
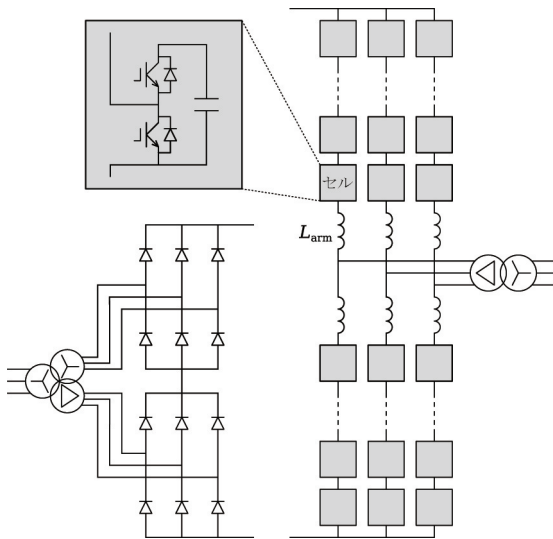


図1 洋上風力発電の直流送電系統（全体構成）



左下：洋上側12パルスダイオード整流器、右：陸上側MMC

図2 両端変換器の回路構成

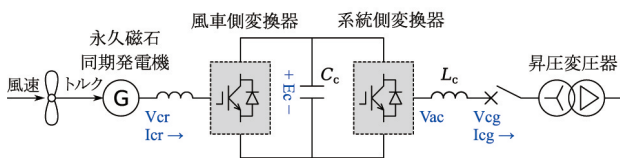


図3 洋上風力発電機内部

送電) 系統を想定した検討がなされているものの、自励式変換器(特にMMC)を適用した検討は少ないのが実状である<sup>(5-7)</sup>。さらに、洋上側のダイオード整流器から発生する高調波が交流集電系などに与える影響を抑制する為に必要な高調波フィルタについても、十分な検討がなされていない。

そこで、洋上側にダイオード整流器、陸上側に自励式変換器(MMC)を設置したHVDC系統を想定して、その制御方式を検討し、PSCAD<sup>(注)</sup>を用いた瞬時値シミュレーションにより、安定した電力融通が図れることを示す。さらに、ダイオード整流器から発生する高調波に対し、洋上側に設置する高調波フィルタの有効性を検証する。

## 2. 直流送電システムモデル

### 2.1 全体構成

想定したモデルの回路図全体を図1に、陸上・洋上変換器の三相結線詳細図を図2に示す。左端のウインドファームから交流集電ケーブルで洋上プラットフォーム(洋上端)に送電し、さらに交直変換器と直流送電ケーブルを介して右端の陸上側交流系統に送電する構成となっている。

定格送電電力は500MW、送電直流ケーブル距離は100kmとした。直流送電部分の回路構成は、双極運転の1/2を表現した非対称単極(asymmetric monopole)とし、陸上側片端接地とした。陸上側は比較的強い系統として、短絡容量比50相当のインダクタンスを介して背後に理想電圧源を設定した。交流系統の周波数は洋上側・陸上側共に50Hzとした。

### 2.2 洋上・陸上変換器

陸上側変換器は図2に示すとおりチョッパセル方式MMCとし、解析では各セルの電圧状態を保持しつつ高速な計算が可能な詳細等価回路モデル(Type 4<sup>(8)</sup>)を採用した。また、MMC内のバッファリアクトルのリアクタンスは、各アームで定格容量に対し10%とした。

洋上側変換器は12パルスダイオード整流器とし、変換器用変圧器はY-Δ結線、Y-Y結線とし、漏れリアクタンスは一般的な値として10%とした。

### 2.3 洋上風力発電機・交流集電系

今回の検討では、洋上ダイオード整流器方式による陸上への安定な定常送電の検証を目的とした為、洋上側系統は簡略化して模擬している。具体的には図3に示す1基分の風車発電機+Back-to-Back(BTB)変換器を模擬し、その出力を定数倍することで500MW送電を実現している。ここで、BTB変換器はスイッチングに起因する高調波が表現されない、簡単で理想的な単純平均値出力モデル(Type 6<sup>(8)</sup>)とした。また、洋上側の交流集電ケーブルは1ルートのみとし、距離は10kmとした。

風車内昇圧変圧器、洋上変圧器は、何れも漏れリアクタンスを10%とした。

## 2. 4 検討ケース

検討ケースは、1.0pu (500MW) 定常送電時の次の2ケースとした。

(ケース1) 特にフィルタを設置しない場合

(ケース2) 図1の洋上側ダイオード整流器の交流端子に、次節に述べるフィルタを設置した場合

シミュレーションにはPSCAD 4.6.0を用い、計算時間刻みは20 $\mu$ sとした。ケーブルは定格電圧・電力に充分耐える絶縁体厚さ・断面積を有し、かつ周波数依存性を表現し得るモデルとした。また、各変圧器の飽和特性も考慮している。

構築したモデルは変換器による安定送電の基本的な動作確認を目的としており、変換器のスイッチング損などが含まれておらず、送電損失は評価の対象外としている。しかし、直流送電の制御には抵抗分が必要であることから、ケーブルは理想的な無損失線路とはせず、先に述べた現実性のあるモデルとしている。

## 2. 5 高調波フィルタ (ACF)

ケース2では、図1の洋上側ACFの位置にC-L-R構成の11次・13次単一同調分路と、23次以上を抑制するC-L//R構成の高次 (HP) 分路 (同調次数は24次) による、国内他励式HVDCシステムで一般的な構成の高調波フィルタ (ACF) を設置した。

各分路の基本波容量は、経済的なフィルタの目安とされる基本波電流 = 高調波電流となるように選定し<sup>(9)</sup>、それぞれ定格送電容量の1/11、1/13、1/24倍とした。この値は、転流リアクタンスを無視して、12パルスダイオード整流器から発生する高調波電流成分の大きさを1/k倍 (ここで、次数 $k = 12n \pm 1$ 次、 $n$ : 自然数) としたものである<sup>(9)</sup>。

また、洋上側系統の基本周波数は、後述のとおり洋上風力発電機のBTB変換器で生成される為、周波数変動幅は商用系統より大きくなることが予想される。そこで、周波数に対してフィルタ効果が大きく変化しないよう、尖鋭度は一般的な値よりやや小さな値とし、単一同調フィルタでは50、高次フィルタでは3とした。

さらにケース2では、ダイオード整流器の直流端子に、直流電流の脈動が定格の5%以下となる直流リアクトル (DCL) を設置した。

## 3. 送電制御方式 (直流リンク方式風力発電機向け)

ダイオード整流器は送電電力の制御が不可能である。そこで図4に示すように、風車内BTBの洋上交流集電側の変換器にて、周波数50Hzの理想的な交流電圧を生成する。さらに、その振幅 $|V_{ac}|$ は、BTB内の直流リンク電圧 $E_c$ が一定となるように制御する方式とした。

陸上MMCが直流ケーブル送電回路の電圧 $V_{dc}$ を決定する制御モードとした為、洋上側の交流電圧振幅は、洋上風力発電電力を送電する為に必要な直流回路の差電圧を形成するように調整される。なお、直流リンク電圧 $E_c$ を一定に制御することにより、風車側変換器からダイオード整流器までの無効電力損失による電圧低下も考慮した交流電圧が作り出される。

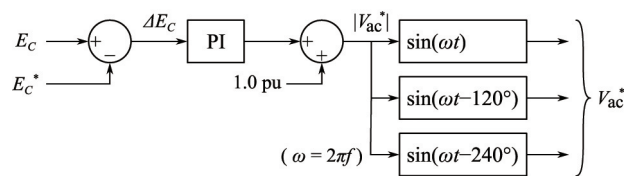


図4  $|V_{ac}|$ によるBTB直流リンク電圧 $E_c$ 一定制御

## 4. シミュレーション結果

### 4. 1 高調波フィルタ未設置時 (ケース1)

1.0pu定常送電の電流・電圧波形を図5に示す。問題無く安定的に送電できていることが知られるが、洋上側の高調波が比較的多い。この時の交流系統電圧・電流の総合歪 (THD) と11次・13次歪の値を表1の上半分「フィルタ未設置」行に示す。参考として、紀伊水道直流連系では系統残留分を含む総合電圧歪率を3%以下、理論調波のみの電圧歪率を各次0.5%・総合1%以下とするよう定められている<sup>(10)</sup>ことを考えると、洋上側の総合歪率は電圧で11.5%と、対策が必要とされる大きさとなっている。

直流送電線路側の脈動 (定格に対するピーク-ピーク値) は、洋上側で定格に対し電圧3%、電流で8%となっているが、陸上側では直流送電ケーブルの有する比較的大きい静電容量分により平滑され、電圧2%、電流5%と低減されている。

陸上側では、MMCの原理により正弦波に近い電圧が出力されることと、直流側の脈動が比較的少なく、背後系統が強いことにより、電圧・電流歪は小さい。

なお、送電電力を0.5puに変化させた場合も安定的に送電できるが、洋上側の高調波は1.0pu時と同様に大きいことを確認している。

また、図4に示した風車発電機BTB制御系の動作確認として、風車出力急変時の応答を検討した。合計出力は一定のまま風車を2並列とし、定格運転中にその片方（半数）が解列した場合を想定した。解析結果を図6に示す。風車解列後、洋上側の電圧振幅は図4の制御に従って減少し、これに応じて直流線路両端の電位差と直流電流が半減している。即ち、1.0pu⇒0.5puの電力を送電する動作点へ問題無く移行していることが判る。解列時の擾乱は20ms（1周期）程度で収束しており、追従性も良好である。

表1 高調波フィルタによる高調波電圧・電流歪の低減効果

		陸上側		洋上側	
		A相電圧	A相電流	A相電圧	A相電流
ケース1： フィルタ 未設置	THD	0.5%	1.3%	11.5%	3.8%
	11次	0.1%	0.4%	5.1%	1.7%
	13次	0.1%	0.4%	5.7%	0.7%
ケース2： フィルタ 設置	THD	0.1%	0.6%	<b>0.8%</b>	0.7%
	11次	0.1%	0.3%	<b>0.2%</b>	0.1%
	13次	0.1%	0.3%	<b>0.2%</b>	0.0%

#### 4. 2 高調波フィルタ設置時（ケース2）

1.0pu定常送電で、前述のフィルタを設置した時の結果を図7に示す。フィルタが効果的に作用し、洋上側電圧・電流波形がほぼ正弦波になることが明らかとなった。また、この時の交流系統電圧・電流の総合歪（THD）と11次・13次歪の値を表1の下半分「フィルタ設置」行に示す。

洋上側 THDは電圧で11.5%⇒0.8%、電流で3.8%⇒0.7%とフィルタ設置により何れも1%以下に低

減できている。特に11次・13次は低めの尖鋭度を選択したにもかかわらず、何れも電圧歪率を0.2%以下にまで低減できている。これら電圧歪率は前述の基準値例（今回は系統残留分を考慮していないので、総合1%・各次0.5%）を下回っている。ただし、今回の検討では洋上系統の周波数変動を設定しておらず、フィルタ最適設計の際には検討が必要と考えられる。

なお、直流側へのリアクトルの設置により、直流電流の脈動も洋上側で8%⇒5%に減少しており、2.5節で述べた「5%以下」の要件を満たしている。

### 5. まとめ

洋上風力発電の直流送電系統において、洋上側変換器をダイオード整流器とする方式の基本的な送電特性を確認する解析モデルを構築し、定常状態のシミュレーションを行った。本方式で安定的な定常送電が可能なることを確認すると共に、ダイオード整流器から発生する洋上側の高調波電圧歪の対策として、高調波フィルタの設置が有効であることも確認できた。

今回のシミュレーションでは基本的な送電原理の検証を目的とした為、特に洋上側を簡略化している。洋上風力発電内BTB変換器のスイッチングに起因する高調波の詳細模擬や、風車複数台時の全体・個別制御の考慮、洋上集電系統の運転状態を考慮した高調波フィルタの最適設計などは、今後の課題である。

当社は、他励式変換器を用いた国内の高圧直流送電プロジェクトの全変換所に高調波フィルタを納入してきた。その際に蓄積した経験と解析技術を活かして、洋上ダイオード整流器方式導入時の合理的な高調波対策を検討していきたい。

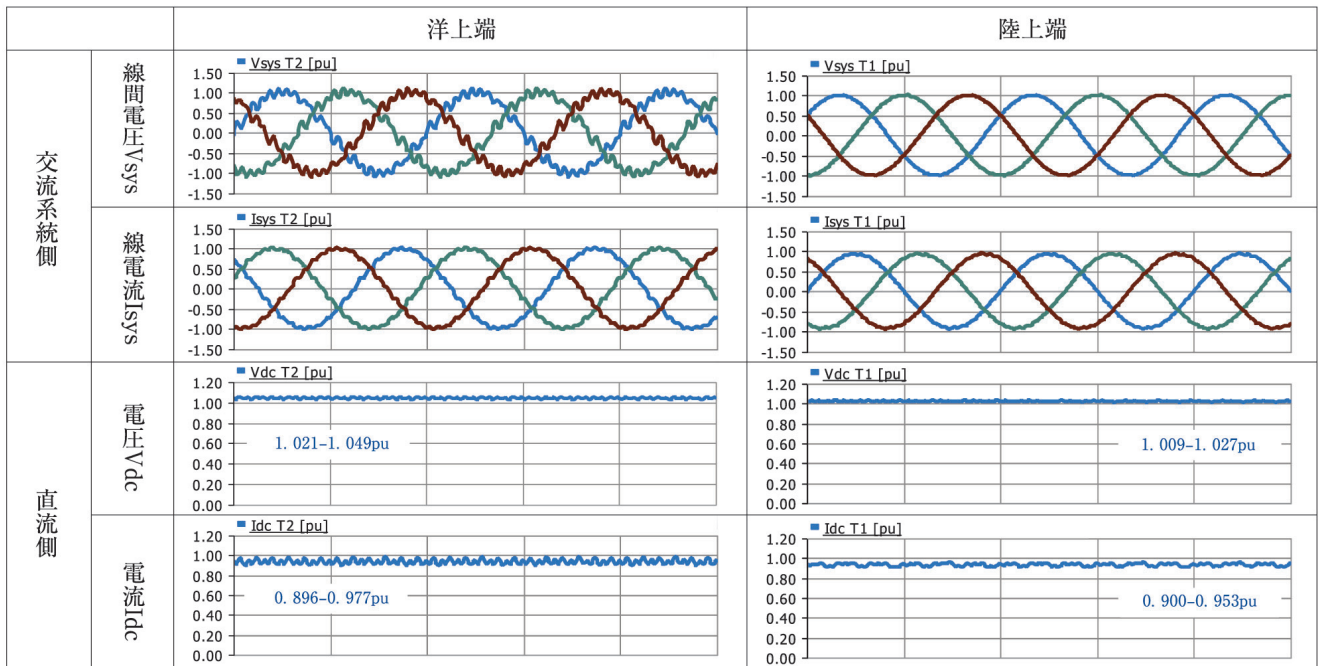


図5 シミュレーション結果（10ms/div） ケース1：1.0pu定常送電時

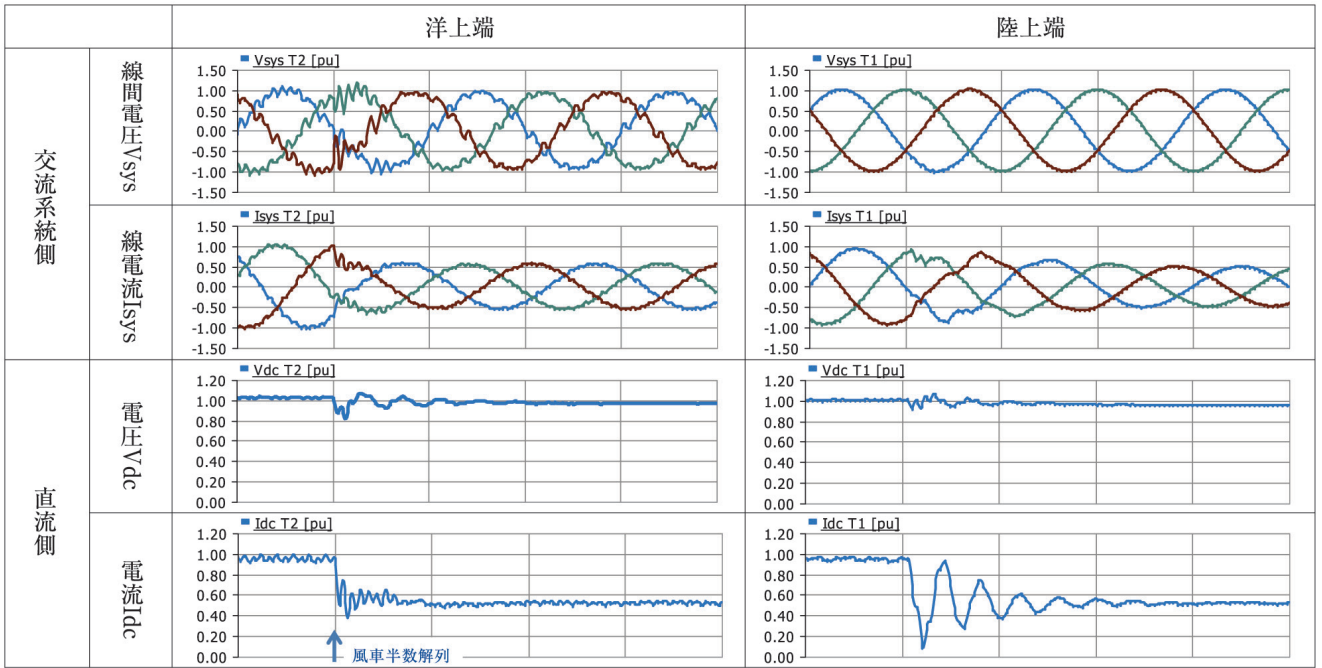


図6 シミュレーション結果 (10ms/div) ケース1' : 定格運転からの風車半数解列

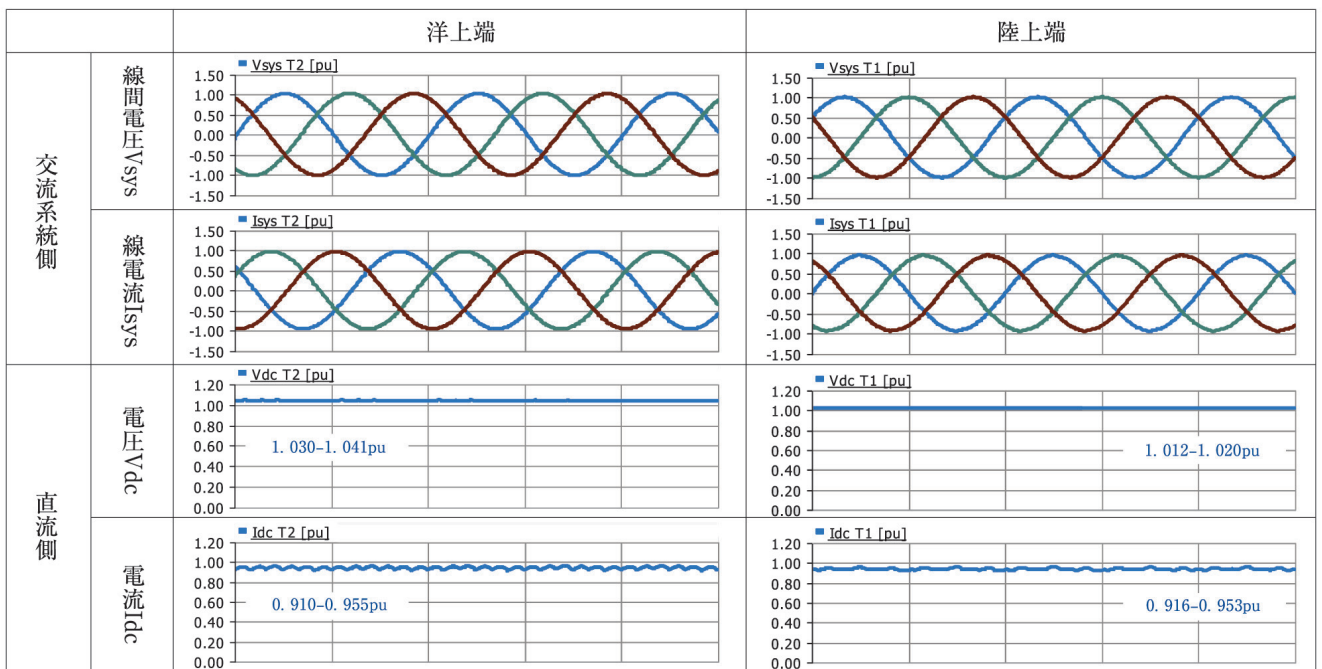


図7 シミュレーション結果 (10ms/div) ケース2 : 1.0pu定常送電 + 洋上側ACF設置 + 直流回路洋上側DCL設置時

参考文献

- (1) C. Bartzsch, et al.: "HVDC PLUS and SVC PLUS: Reliable and Cost-effective Power Transmission Solutions with Modular Multilevel Converters", CIGRE Australia NC Colloquium on HVDC and Power Electronics (2011.10)
  - (2) Siemens AG: "Siemens presents new DC grid connection for offshore wind farms" (2015.10)  
<http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2015/energymanagement/2015-10-dc-grid/presentation-dc-grid-e.pdf>
  - (3) T. Machida, et al.: "Control and protection of HVDC systems with diode valve converter", Electrical Engineering in Japan, Vol.98, No.1, pp. 49-56 (1978.1)
  - (4) S. Hungsasutra, et al.: "Unit connected generator with diode valve rectifier scheme", IEEE Trans. PE, Vol.4, No. 2, pp.538-543 (1989.5)
  - (5) T. Hammer, et al.: "Diode-Rectifier HVDC link to onshore power systems: Dynamic performance of wind turbine generators and Reliability of liquid immersed HVDC Diode Rectifier Units", CIGRE Paris 2016 Session, B4-121 (2016.8)
  - (6) D. Herrera, et al.: "Method for controlling voltage and frequency of the local offshore grid responsible for connecting large offshore commercial wind turbines with the rectifier diode-based HVDC-link applied to an external controller", IET Electric Power Applications (2017.8)
  - (7) R. Blasco-Gimenez, et al.: "Distributed Voltage and Frequency Control of Offshore WF Connected with a Diode-Based HVDC Link", IEEE Trans. PE, Vol.25, No.12, pp.3095-3105 (2010.12)
  - (8) CIGRE Working Group B4.57: "Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid" (2014.12)
  - (9) 宮田: 「高調波問題とその考え方」、設備設計 第19巻12月号、pp.26-30 (1984.12)、第20巻5月号、pp.18-23 (1985.05)
  - (10) 電気協同研究会: 「電力系統用パワーエレクトロニクス設備の現状と設計・保守基準」、電気協同研究 第57巻 第2号、p.229 (1991.10)
- (注) PSCAD は、Manitoba Hydro International Ltd. (カナダ) の登録商標です。

執筆者紹介



久保 敏裕 Toshihiro Kubo  
研究開発本部  
電力技術開発研究所



黒田 和宏 Kazuhiro Kuroda  
研究開発本部  
電力技術開発研究所  
主幹



荻原 義也 Yoshiya Ogihara  
研究開発本部  
電力技術開発研究所長



平崎 敬朗 Norio Hirasaki  
電力・環境システム事業本部  
静止機器事業部  
技術部 主幹



長崎 則久 Norihisa Nagasaki  
電力・環境システム事業本部  
静止機器事業部  
技術部長