

機関番号：10106  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560255  
 研究課題名（和文） スタンドアロン形ウィンドファームによる高効率水素製造システムの設計  
 研究課題名（英文） Design of high efficiency hydrogen generator based on a stand-alone wind farm  
 研究代表者  
 田村 淳二 (TAMURA JUNJI)  
 北見工業大学・工学部・教授  
 研究者番号：40171897

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、基本的に電力系統に接続しないスタンドアロン形のウィンドファームを想定し、風力発電出力を用いて電気分解装置により水素製造を行うシステムの設計を行った。具体的には、固定速風力発電機から成るシステム、交流励磁形誘導発電機から成るシステム、永久磁石形同期発電機からシステムを対象として、風力発電機、電解槽、蓄電装置の協調制御により水素を発生するシステムを構築し、それぞれの性能を検証した。

## 研究成果の概要（英文）：

In this project, a new system to produce hydrogen from wind generator output has been designed, which is constructed as a stand-alone system without being connected to a power grid. Three types of wind generators, i.e., constant speed generator, doubly fed induction generator and permanent magnet synchronous generator, are considered, and hydrogen production system, which is composed of each type of wind generator, electrolyzer and battery system and controlled cooperatively to each other, is established and analyzed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：電力工学・電気機器学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：風力発電、電気分解、水素製造、独立系統、可変速風力発電機、フライホイール運転

## 1. 研究開始当初の背景

炭酸ガス排出抑制等の観点から風力発電の導入が増加しているが、出力変動による電力

系統周波数変動の問題があり、電力会社側の受入れ枠の増加がしだいに困難になりつつある。また、風況的に発電に適していても、電

力系統へ連系した運用を前提とする限り、近傍に送電線が無い等の理由により、これらの適地点を有効に生かすことも困難になりつつある。このような状況を背景として、本研究では基本的に電力系統に接続しないスタンドアロン形のウィンドファームを想定し、風力発電出力を用いて電気分解装置により水素製造を効率的に行うシステムの回路設計を行う。これより、系統連系の制約なしに風況の良い地点に容易に導入が可能となり、風力発電の更なる増加に寄与できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、スタンドアロン形のウィンドファームを想定し、風力発電出力を用いて電気分解により水素製造を行うシステムを構築する。水素の貯蔵と輸送に関しては、ウィンドファームに併設される水素ステーションを基礎として、水素トレーラー等により消費地へ輸送するシステムを想定する。水素は電気自動車や家庭用コージェネレーション用燃料に代表されるように次世代エネルギーの本命と目されており、将来的にその需要が急増すると予想されるが、現状では主として化石燃料の改質により製造されており、製造過程でCO<sub>2</sub>を排出する等の問題がある。これに対して、CO<sub>2</sub>を排出しない風力などの自然エネルギーを利用した水素製造は非常に有力な方法として期待されている。

本研究は、スタンドアロン形ウィンドファーム出力による水素製造システムにおいて、発電機変動出力により電気分解装置に与える悪影響を極力小さくし、かつ効率的に水素を取り出すシステムの設計を目的として検討を行うものである。

## 3. 研究の方法

可変速風力発電機、風況データ、電気分解装置、蓄電装置のモデリング等に必要データ収集調査を行う。続いて、固定速風力発電機から成るシステム、並びに交流励磁形誘導発電機と永久磁石式同期発電機による可変速風力発電機から成るシステムを用いて解析モデルを構築する。ここで、風力発電機のフライホイール運転の制御方式、電気分解装置切替運転のためのDC/DCコンバータ制御ロジック、蓄電装置の充放電制御ロジックを検討する。これらの結果を基礎としてPSCAD/EMTDC上に解析モデルを構築して、

全体システムの制御系をシミュレーション解析を通して設計する。

## 4. 研究成果

### (1) 固定速発電機による水素製造システム

図1に構築したモデルシステムを示す。IGは誘導発電機であり、そこに水素製造装置、エネルギー貯蔵装置が併設されている一機無限大母線系統である。本モデルはスタンドアロンシステムではないが、系統との間の遮断機を開き、単独系統としても運転可能ないように制御システムを設計した。

電解槽は、ダイオード整流器とDC-DCコンバータとしての降圧チョップを通して3台が並列に接続されている。電解槽は、風力発電機の出力に応じて内部並列接続数を変化させ消費電力を階段状に変化させる。協調制御は蓄電池システムが統括する。蓄電池は電圧型コンバータ(VSC)と2象限チョップを通して系統に接続されている。

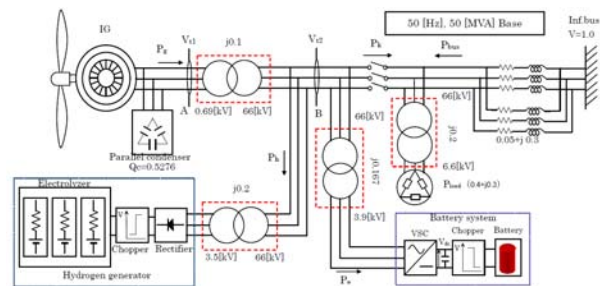


図1. 固定速発電機によるシステム

計算機シミュレーションに用いた風速データを図2に示す。これは北海道で測定された実風速データである。ここではシミュレーション時間を1300[sec]とし、このうち後半の600秒間は解列運転とした。つまり、系統接続運転を600[sec]まで行い、600[sec]から700[sec]までの間に出力を徐々に絞っていく解列準備段階、700[sec]に解列運転へ切り替わるとした。この3つの状態におけるそれぞれの運転動作と切り替わり動作が正常に行われるかを確認した。

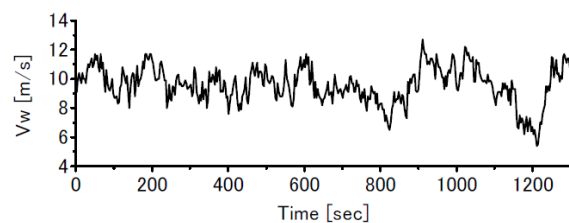


図2. 風速データ I

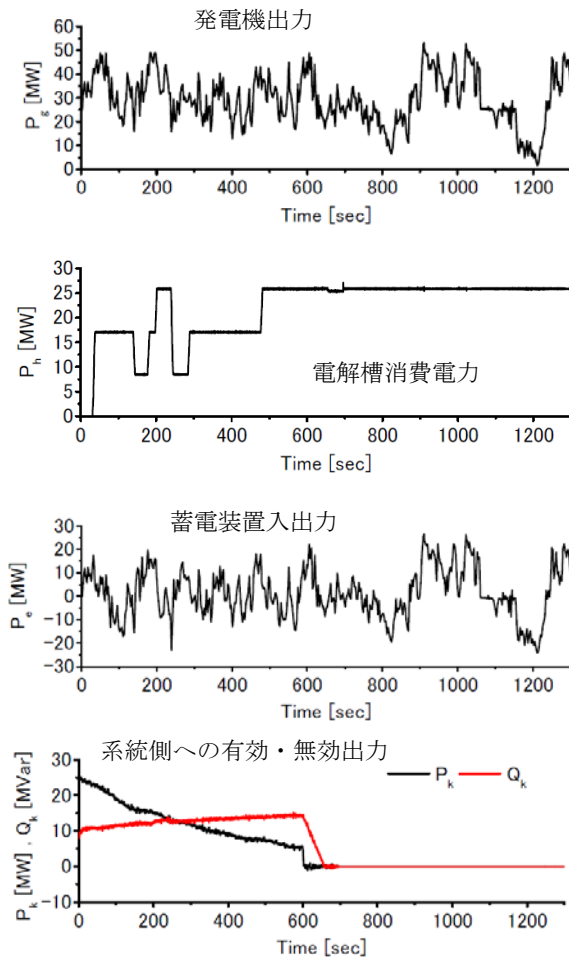


図3. シミュレーション結果 I

図3にシミュレーション結果を示す。発電機出力は図2の風速変動に伴い変動しているが、電解槽は切換運転によりその消費電力を調整している。更に、これらと協調した蓄電装置の平滑化制御により、系統側への出力は平滑化されているが、加えて解列準備段階の600[sec]から700[sec]までは有効電力、無効電力が徐々に減衰していき、700[sec]で0になっている。従って、この後はウィンドファームはスタンドアロン運転となるが、電解槽による水素製造は継続して行われており、全体の制御システムが問題なく動作していることが確認できる。

(2) 交流励磁形誘導発電機 DFIG による水素製造システム

系統モデルを図4に示す。3機のDFIGから構成されるウィンドファームの系統連系点に水素製造装置を併設し、系統側は水力発電機(HG)1機、火力発電機(TG)2機、原子力発電機(NG)1機と負荷から構成される。

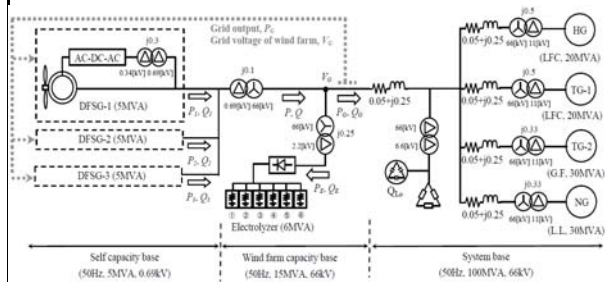


図4. DFIGによるシステム

水素製造装置は図5に示すようにダイオード整流器に6ブロックに分割された電解槽が降圧チョップを通して並列に接続された構成とし、ON/OFFを独立に制御することができる。ON/OFF制御に関しては、個々の電解槽の動作時間の平均化のため「最初ONしたのからOFFする」という動作シフトを採用した。

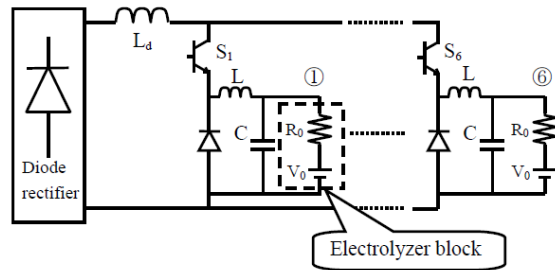


図5. 水素製造装置の構成

制御系の基本的動作としては、風力発電機から出力される変動電力を平滑化して系統へ送るために、可変速風力発電機のフライホイール(FW)運転と電解槽の切換運転の協調を取るような制御システムとして設計した。

計算機シミュレーションに用いた風速データを図6に示す。3台の発電機にそれぞれ異なる風速を設定した。

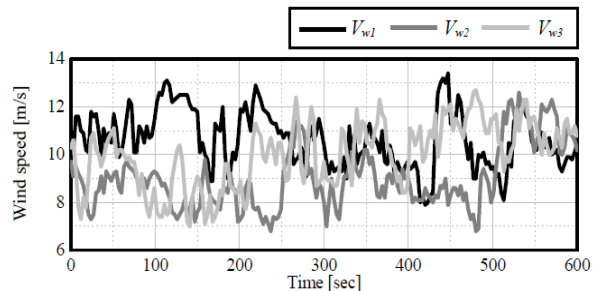


図6. 風速データ II

図7にシミュレーション結果を示す。風力発電機は通常のMPPT運転と本研究でのFW運転の二つの場合で比較を行う。ここでは、ウィンドファーム出力  $P$ 、水素製造装置消費電力  $P_h$ 、系統出力  $P_g$ を示している。これより、

MPPT 運転の場合に比較して FW 運転の場合には、電解槽にて電力が消費されると同時に系統側にかなり平滑化された電力が送電されていることが確認できる。図 8 に風力発電機のうち DFSG-1 の応答を示す。FW 運転では MPPT 運転より回転速度が高くなる領域が多く、その分エネルギーを運動エネルギーとして蓄積していることが確認できる。しかしながら、有効電力の差はそれほど大きくはない。図 9 に各電解槽ブロックの消費電力を示す。何れの場合にも 6 台の電解槽が動作シフトにより順に ON/OFF され、稼働率が平均化されていることが確認できる。図 10 に系統周波数の応答を示す。 $P_G$ の平滑化制御により重負荷時、軽負荷時共に FW 運転の方が変動を大幅に抑制できており、変動幅も日本の東地域周波数許容偏差  $50 \pm 0.2$  [Hz] の範囲内にほぼ収まっている。一方、MPPT 運転の場合にはこの範囲を大幅に超えている。

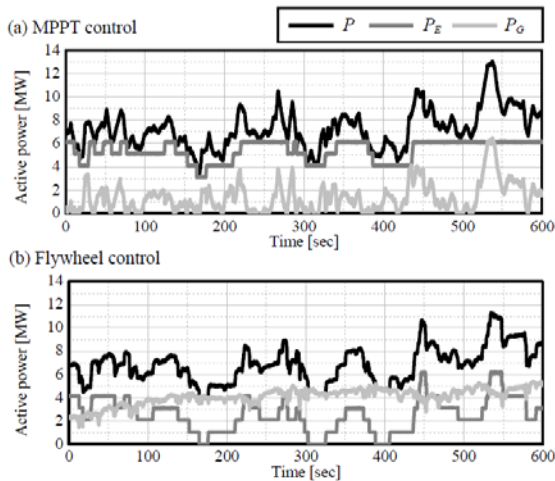


図 7. シミュレーション結果 II(a).

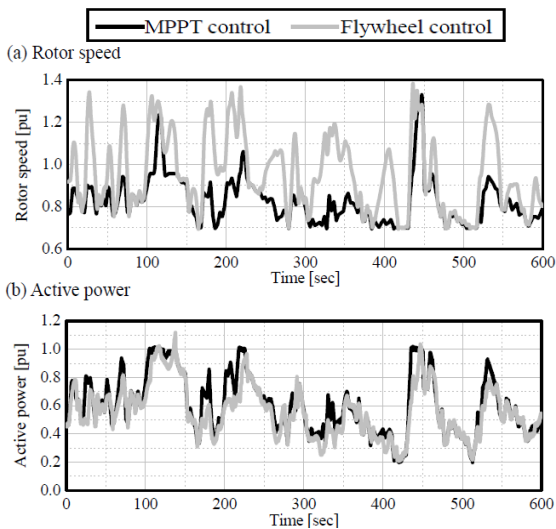


図 8. シミュレーション結果 II(b).

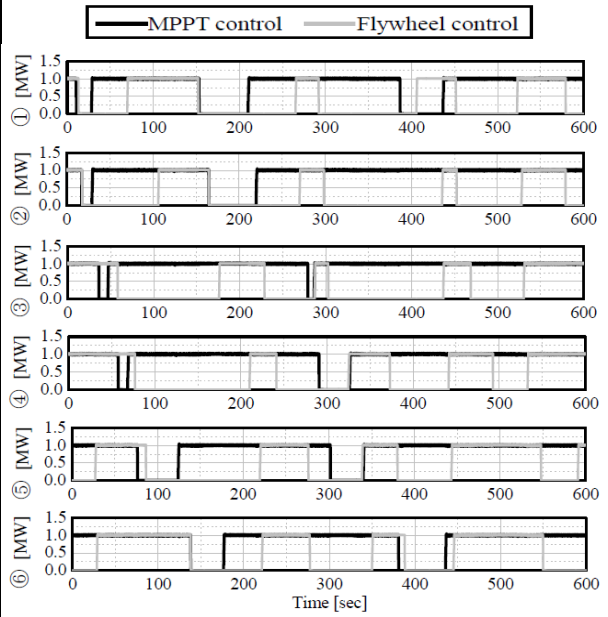


図 9. シミュレーション結果 II(c)

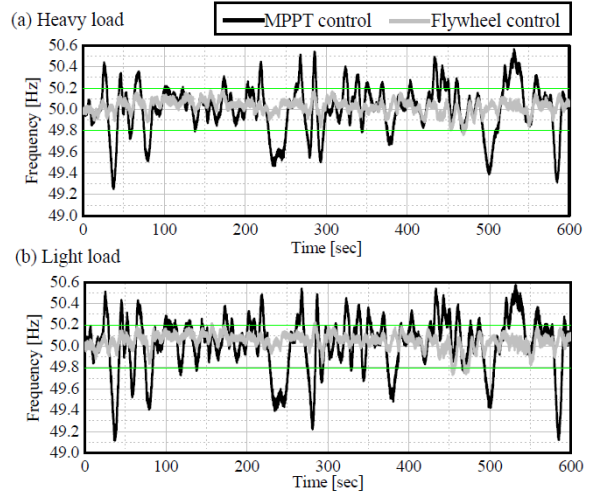


図 10. シミュレーション結果 II(d)

### (3) 永久磁石形同期発電機による水素製造システム

図 11 がモデル系統であり、永久磁石型同期発電機 (PMSG) による可変速風力発電機、整流器、蓄電装置、降圧チョッパ、DC-DC コンバータ、水素発生器で構成され、電力系統に接続されない独立系統となっている。

発電機変動出力を補償するため、昇降圧 DC-DC コンバータを用いた蓄電池の充放電制御により、電力を平滑化する。水素発生器は図 12 に示すように 3 台の電解槽の並列接続で構成され、動作シフトに基づく ON/OFF 制御により、風速に応じて決まる発電機出力目標値に応じて電解槽の並列接続数を変えて、電解槽の消費電力を階段状に変化させる。

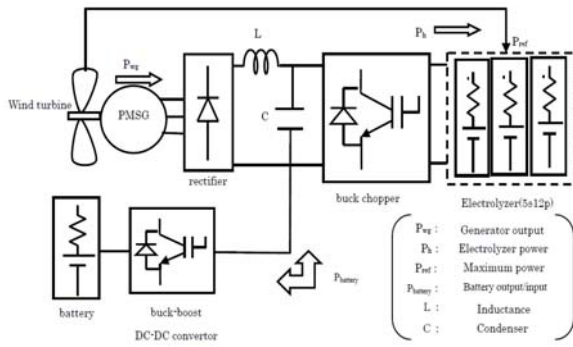


図 11. PMSG によるシステム

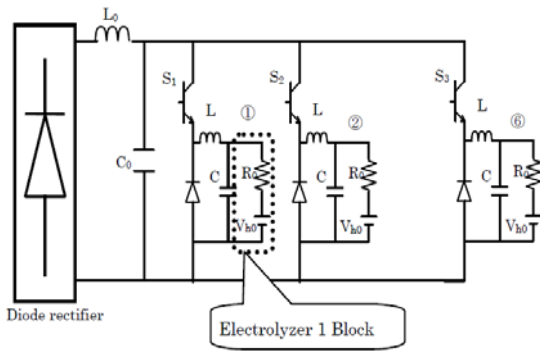


図 12. 水素発生器の構成

蓄電装置のエネルギー容量( $E_c$ )の制限設定による有用性を確認するため、(a)エネルギー容量( $E_c$ )の制限無しの場合と(b)制限ありの場合による比較検討も行った。図 13 は解析に使用した風速データである。図 14~19 はシミュレーション結果を示す。図 14, 15 より発電機回転数、発電機出力共にほぼ目標値に追従していることが確認できる。図 16 では、発電機出力定格(2.66MW)に対して蓄電池定格出力(1.2MW)が約半分であってもほぼ定格を超えることなく充放電制御を行っていることが確認できる。図 17-18 について、(a)の場合ではエネルギー容量定格を超えてしまうことがわかる。しかし、(b)の場合はエネルギー容量定格に達すると電解槽を ON してこれ以上充電量を増やさないように動作していることが確認できる。一方、蓄積エネルギーが 30%まで下がると電解槽がすべて OFF されすべての発電機出力を蓄電池に供給していることが明らかである。また、図 19 より水素ガス発生量は(b)が(a)と比べてわずかに上回っていることも確認できたため、本研究での制御法の有用性が明らかとなった。

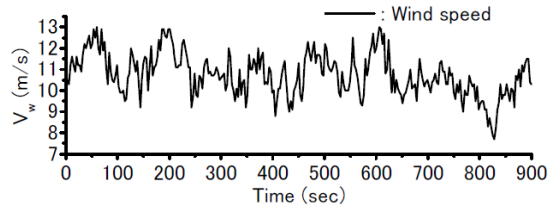


図 13. 風速データ III

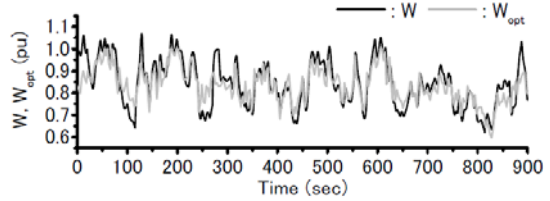


図 14. 発電機回転数と目標値(ケース b)

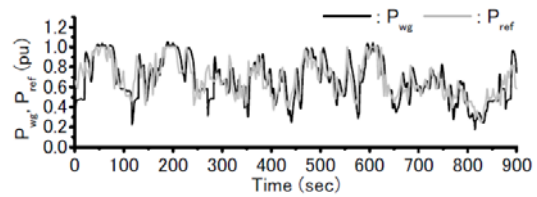


図 15. 発電機出力と目標値(ケース b)

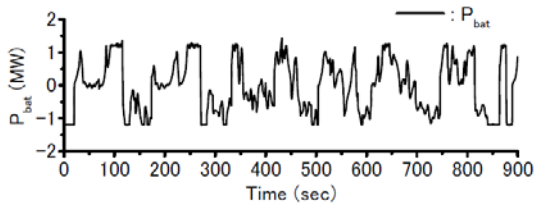


図 16. 蓄電池出力(ケース b)

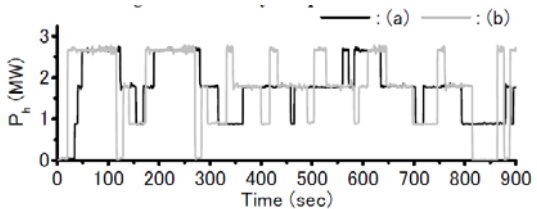


図 17. 電解槽全体の消費電力(ケース b)

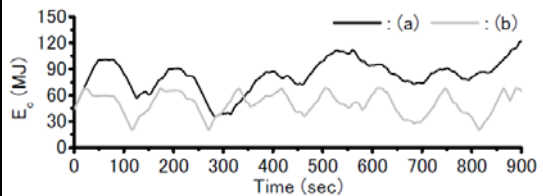


図 18. 蓄電池蓄積エネルギー

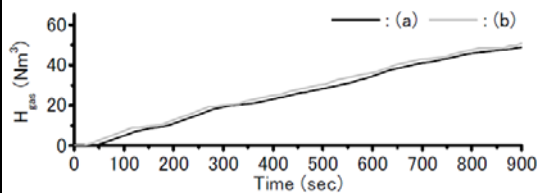


図 19. 水素ガス発生量

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計17件)

- ① 竹内彰浩: 可変速風力発電システムの協調制御による系統周波数変動の抑制、電気学会電力系統技術研究会(PSE-11-007)、2011/01/21、札幌.
- ② N.Kurose: A Consideration on the Determination of Power Rating of Energy Storage System for Smoothing Wind Generator Output, International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, 2010/10/11, 韓国・インチョン.
- ③ M.Nakatani: New ESS Connection Scheme in Wind Generator Output Smoothing Control, International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, 2010/10/11, 韓国・インチョン.
- ④ 中谷 正親: 水素電解槽を併設した風力発電システムの効率に関する比較検討、電気学会回転機研究会(RM-10-061)、2010/05/28、東京.
- ⑤ M. R. I. Sheikh: Smoothing Control of Wind Generator Output Fluctuations by Using Superconducting Magnetic Energy Storage Unit, 12th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2009), 2009/11/17, 東京.
- ⑥ 荒巻 博行: 蓄電池併設型風力発電システムを用いた水素製造に関する検討(続報)、電気学会回転機研究会(RM-09-37)、2009/05/15、東京.
- ⑦ 福田 篤史: 水素製造装置を併設したウ

インドファームの新しい制御法、電気学会回転機研究会(RM-09-36)、2009/05/15、東京.

- ⑧ 大槻 勇介: 交流流励磁形可変速風力発電機による水素製造システムに関する研究、電気学会回転機研究会(RM-08-98)、2008/11/12、名古屋.
- ⑨ 荒巻 博行: 蓄電池併設型風力発電システムを用いた水素製造に関する検討、電気学会回転機研究会(RM-08-97)、2008/11/12、名古屋.
- ⑩ 福田 篤史: エネルギー貯蔵装置を併設したウインドファームによる水素製造に関する研究、電気学会回転機研究会(RM-08-96)、2008/11/12、名古屋.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田村 淳二 (TAMURA JUNJI)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号: 40171897

### (2) 研究分担者

高橋 理音 (TAKAHASHI RION)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 60301975

### (3) 連携研究者

なし