

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月21日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究（C）（一般）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560315

研究課題名（和文）

アクティブフィルタ機能を有する交流チョッパ式高効率単相 UPS の開発

研究課題名（英文）

Development of High Efficient AC Chopper Type UPS with Active Filter Ability

研究代表者

安東 至 (Ando ITARU)

秋田工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号：20212665

研究成果の概要（和文）：

本研究は、アクティブフィルタ機能を有する交流チョッパ式高効率単相 UPS とその制御方法を提案するとともに、その有効性を確認することである。日本では長時間の電源異常はほとんどないが、自然災害に起因する瞬時電圧低下や瞬時停電を完全に防ぐことは難しく、大震災を契機に電源の安定供給にも不安が生じている。その対策として UPS の需要が増加しており、本研究では、積極的に電源の電力供給能力を活用する昇降圧動作が可能で電力直送を基本動作とする UPS を開発した。

研究成果の概要（英文）：

This project proposes the high efficient AC chopper type UPS with active filter ability and its control method, and verify control capability by carrying out experiments under normal and abnormal condition. Recently, there is little possibility of long-term power accident in our country but it's difficult to prevent instantaneous power failure and voltage drop caused by natural disaster. This has led to an increasing demand for a short-time power compensation type UPS (Uninterruptible Power Supply). Proposed UPS has boost and buck control ability by AC chopper.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4160,000

研究分野：工学

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：UPS, 交流チョッパ, アクティブフィルタ, 高効率

1. 研究開始当初の背景

我が国における電力システムの信頼性は、電力供給設備の強化と適切な運用によって、きわめて高いものとなって久しく、長時間の停電などの電源異常は著しく減少している。しかし、瞬時停電や瞬時電圧低下等の電源異常は、落雷や暴風などの自然現象によっても発生し、また、人的な災害として引き起こされる

ことも皆無とはいいい切れず、現在の最先端技術をもってしても完全に防ぐことは困難な状況にある。その一方で、社会生活の高度情報化に伴い、コンピュータをはじめとする各種OA機器の普及により、電源異常の無い高品質電力の供給が求められている。これは、10%～20%の電圧低下がわずか0.003～0.02sec 続くだけで、OA機器内のメモリ内

容消失、プログラムの誤動作や停止などのトラブルを引き起こすためである。現在の電力系統事情から一般に電源異常は数秒で復帰する場合がほとんどであるが、トラブルを引き起こした機器の補償や再起動にかかる時間等、その損失は大きく、特に工場や金融、オフィス等では莫大なものとなる。この対策として、UPSの需要が増加している。

一般のUPSのほとんどは、単方向スイッチとして動作する半導体スイッチング素子IGBT等を用いたブリッジ形電力変換器により構成されている。これらは入力側を正弦波電流PWMコンバータ、出力側を正弦波電圧PWMインバータとしてDCリンク部で接続する構成がほとんどで、「単相交流入力→直流→単相交流出力」と2度の変換が行われるため、効率低下の原因となっていた。また、直流部での電力平滑化が必要であるため、大きくて寿命の短い電解コンデンサを主回路に採用せざるを得ず、小形軽量化への足かせとなっていた。さらに、多くのUPSは、電源異常時のエネルギー源として寿命の短いバッテリーを用いている。バッテリーは、補償電力が一定である場合は大きさや重さが電力補償時間の長短にあまり影響されない特性を持ち、1分程度の短時間補償用としては小形軽量化、長寿命化において改善を必要とされていた。

これに対し、研究代表者は効率向上と小形軽量、長寿命を目的にフライホイール式UPS、UPS用電解コンデンサレス三相電力変換器およびレグ共通形電力変換器、アクティブフィルタ機能を有するフライホイール式UPSなどを提案し開発してきた。また、レグ省略形電力変換器やレグ共通形電力変換器に代表されるブリッジ形電力変換器を基本とした主回路構成の有効な変形やその基本制御の導出についても検討を重ねてきた。これらの検討より、UPS用電力変換器の小形軽量・メンテナンスフリー化のためには絶縁トランスレス、電解コンデンサレス構成が有効で、また、効率向上においては、交流入力→交流出力直接変換方式の電力変換器を採用することが効果的であると確認された。最近では、三相電力変換器として逆阻止形電力用半導体素子を用いたマトリクス電力変換器を利用して、効率向上と小形化を達成する手法も数多く発表されている。しかし、現時点では、1モジュール逆阻止形IGBTに代表される素子の入手が困難であり、コストダウン化の課題もあり、既存素子で逆阻止形IGBTを構成しているのが現状である。

以上のことから、単相UPSにおいては、絶

縁トランスレスと電解コンデンサレスを実現し、既存素子で構成される交流入力→交流出力直接変換方式による回路構成の開発と制御法が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、双方向半導体スイッチを用い、交流昇降圧チョップ動作とアクティブフィルタ機能を併せ持つ高効率単相UPSを提案、開発する。開発するUPSは1モジュールの逆阻止形双方向スイッチが入手困難であるため、市販の単方向IGBTを直列に接続し、逆導通双方向スイッチを構成し開発する。主回路は入力チョップと出力チョップ、そして、アクティブフィルタ、バッテリー充電およびインバータ機能を併せ持つブリッジ形電力変換器から構成される。主回路の入出力チョップ回路リンク部に電解コンデンサが不要であり、また、入出力の1線が共通であるため絶縁トランスも不要である。開発する定格2kVAの試作機を用い、抵抗負荷、そして整流器負荷に焦点を絞り、以下の項目を達成する制御方式についてシミュレーションを通して開発するとともに、実験により実証する。

(1) 入力力率 98%以上、出力電圧変動率 3%以下、出力電圧歪み率 5%以下を達成する。

(2) 電源 100V 正常時の効率は 90%以上を達成する。

(3) 電源電圧低下および上昇時においても瞬時に昇圧および降圧動作を行ない、変動の無い安定した出力電圧を確保するとともに上記(1)を満足する。

(4) 電源停電時においても瞬断の無い安定した高品質出力電圧を確保する。

(5) 電源復電時においても突入電流の無い、速やかな電源正常動作への移行を実現する。

上記の制御は高速積和演算を可能にするDSPによるデジタル制御で行ない、また、今後、1モジュールによる逆阻止形双方向IGBTが入手できれば、電力経路における素子数が低減することから積極的に採用し、効率向上を一層押し進める。

3. 研究の方法

1年目の平成21年度は提案する「アクティブフィルタ機能を有する交流チョップ式高効率単相UPS」の主回路構成において、定常時に整流器負荷時においても入力力率 98%以上、出力電圧変動率 3%以下、出力電圧歪率 5%以下を実現するデジタル制御手法についてデジタルシミュレーションを用いて確立するとともに、試作機製作のための回路設計を行ない、完了次第、製作に取りかかる。

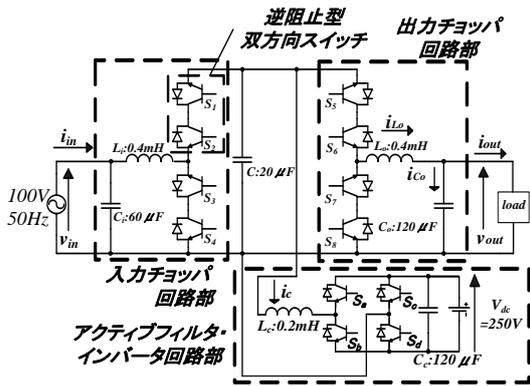


図 1 アクティブフィルタ機能を有する交流チョップパ式高効率単相 UPS

図 1 に示す主回路においては、現時点では入手が容易な IGBT を用いて双方向スイッチ構成とするが、逆阻止型スイッチが入手できるようになれば一層の効率向上が望める。主回路は入力 LC フィルタ、 $S_1 \sim S_4$ で構成される入力交流チョップパ回路部、出力 LC フィルタと $S_5 \sim S_8$ で構成される出力交流チョップパ回路部、そして、リアクトルと $S_5 \sim S_8$ で構成されるアクティブフィルタ/バッテリー回路部により構成され、寿命の短い電解コンデンサや大型で重い絶縁トランスは不要である。

本回路は動作モードとして、(1) 電源正常時、(2) 電源電圧低下/上昇異常時、そして、(3) 電源停電時の 3 つのモードに分けることができる。

通常時はそのほとんどが(1)のモードであり、入出力交流チョップパ回路部においてはスイッチング損失を発生しない。また、(1)、(2)モードは交流→交流直接変換であり高効率期待できる。さらに追加のバッテリー充電回路や停電時の電源切り離し回路も不要であることから、回路利用率が高く、小型化と効率向上に大きく寄与する。

1 年目は、抵抗および整流器負荷において目的に掲げた入力力率、出力電圧変動率および歪率の達成に向け、シミュレーションソフトウェア Psim によりデジタルシミュレーションを行い、制御回路設計を行い、制御が確立次第、試作機の製作に取りかかる。

本回路は、回路中に電解コンデンサ等エネルギーバッファ回路が無いため、離散化等により波形に歪みなどの影響が顕著に表れる可能性がある。そのため、予測制御や補償器の操作量飽和対策などの対応が必要となる可能性も十分に考えられる。これらについては、制御理論の専門家である長岡技術科学大学 大石潔教授に連携研究者として助言等の協力をお願いする。

2 年目の平成 22 年度は引き続き試作機の製作を行なう。基本的な試作は平成 22 年度前期中に完了させ、その後、制御ゲイン調整をはじめ、停電検出、復電検出と通常動作への切り替えタイミングの決定等行なう。通常動作への切り替えは、出力電圧に歪み等の影響が生じないようにデジタル PLL 回路で出力電圧が電源電圧に完全同期後に出力電圧ゼロクロスタイミングで切り替えを行なう。また、アクティブフィルタの制御ゲインを多少低めに設定し、制御の安定化に重点を置いた場合、負荷状態によっては電源電圧と入力電流に多少の位相差が生じ、入力力率が悪化する恐れがある。これを解消するため、自動同相化回路を開発し、アクティブフィルタの入力電流指令値の位相を補正する制御を取り入れる。

3 年目の平成 23 年度は試作を完了した提案する UPS を用い、各種実験を行ない有効性を実証する。実験は抵抗負荷とコンデンサ入力形整流器負荷において定常特性、電源電圧異常特性、停電特性等を取得し、入出力電圧、電流を観測、分析する。定常特性においては、効率、入力力率、出力電圧変動率、出力電圧歪み率を取得・分析し、開発した UPS の有効性を実証する。

4. 研究成果

本 UPS が定常時に対応する (1) 定常モード、電源異常時に対応する (2) 降圧モードおよび (3) 昇圧モード、停電時に対応する (4) 停電モードにおける各制御手法と実験結果について述べる。

各モードにおいて利用する入力電流指令値は、瞬時出力電力 p_{out} から入力電流指令値 i_{in}^* を算出している。瞬時出力電圧 v_{out} と瞬時出力電流 i_{out} を乗じることにより、瞬時出力電力 p_{out} を算出する。これより平均出力電力を求め、入力電圧実効値で除することで入力電流実効値を求めている。これに電源電圧と同相の 50Hz の電流基本波成分を乗じることにより、出力電力に応じた基本入力電流指令値 i_{in}^* としている。

(1) 定常モード時の制御手法と実験結果

図 2 に電源に異常が見られない定常モードにおけるアクティブフィルタ制御ブロック図を示す。定常モードでは、入力チョップパならびに出力チョップパは動作させず、入力側から出力側へと電力をそのまま直送給電する

ためスイッチ S_1 , S_2 , S_5 , S_6 を ON, S_3 , S_4 , S_7 , S_8 を OFF とする。

一方、アクティブフィルタ回路では、入力

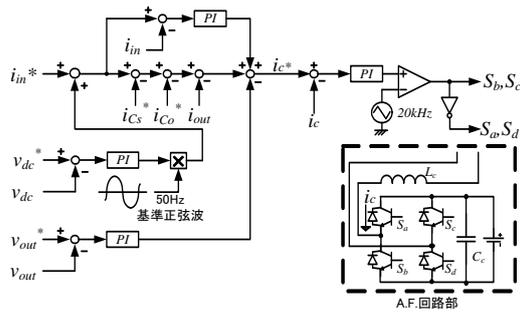


図 2 定常モード時におけるアクティブフィルタ制御ブロック図

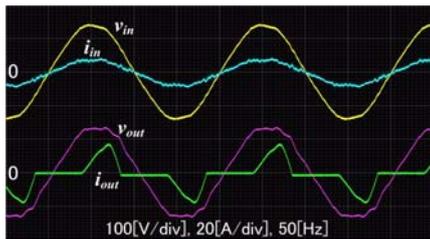


図 3 定常モード時における実験結果

力率 100%制御・出力電圧正弦波制御を行うと同時に、アクティブフィルタ回路に接続されているバッテリーへの充電を行う必要がある。そこで、補償電流指令値 i_c^* の決定に当たっては、出力電力から算出した基本入力電流指令値 i_{in}^* から、負荷電流 i_{out} 、出力フィルタコンデンサ電流 i_{Co}^* 、リンクコンデンサ電流 i_{Cs}^* を引き、補償電流指令値 i_c^* を算出、これに実際の i_c が $S_a \sim S_d$ のスイッチングで追従するように制御することを基本とする。

図 3 に定常モード時におけるコンデンサ入力型整流器負荷時の実験結果を示す。電源電圧は 100Vrms である。波形から入力電流は入力電圧とほとんど同相で正弦波状になり、入力力率 98.5% であることが確認できた。また、出力電圧総合歪率 THD (Total Harmonic Distortion) は 4.7%，入出力効率は 666W の抵抗負荷時に 88.0%，963W の整流器負荷時に 85.7% であった。

(2) 降圧モード時の制御手法と実験結果

一般的に電源電圧が高くなってしまいう電源異常は稀であるが、このモードでの入力チョップパ回路部はスイッチング動作を行わず、 S_1, S_2 が ON, S_3, S_4 が OFF となる。一方、出力チョップパ回路部は S_5, S_6 が PWM 動作を、 S_7, S_8 が電源の正負によって ON/OFF を切り替える。

降圧モード時における出力チョップパ制御ブロック図を図 4 に示す。本制御は所望の出力電圧が v_{out} に生じる際に流れる出力フィル

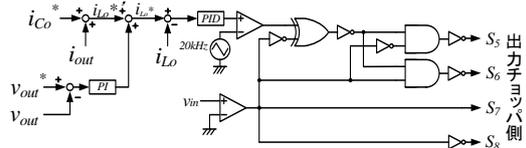


図 4 降圧モード時における出力チョップパ制御ブロック図

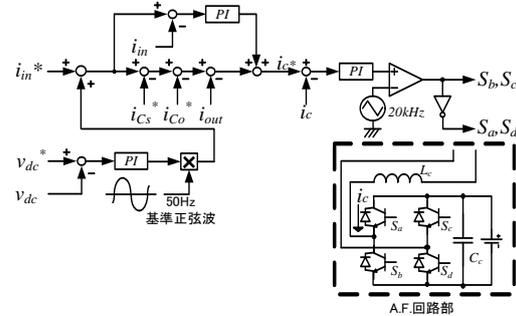


図 5 降圧モード時におけるアクティブフィルタ制御ブロック図

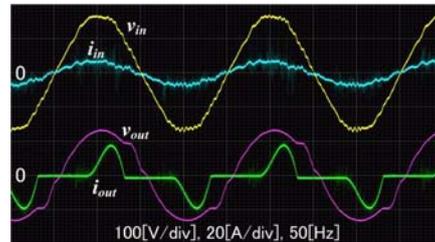


図 6 降圧モード時における実験結果

タコンデンサ電流 i_{Co}^* に実際の負荷電流 i_{out} を加え、実際の i_{Lo} を $S_5 \sim S_8$ により追従制御することを基本としている。

降圧モード時におけるアクティブフィルタ制御ブロック図を図 5 に示す。入力電流指令値 i_{in}^* より負荷電流 i_{out} 、出力フィルタコンデンサ電流 i_{Co}^* 、リンクコンデンサ電流 i_{Cs}^* を引き、基本補償電流 i_c^* を得、これに実際の i_c が追従するように制御することを基本とする。

図 6 に降圧モードにおける整流器負荷時の実験結果を示す。アクティブフィルタからの補償電流によって入力電流の波形改善が行われ、入力電流は正弦波状で入力電圧と同相であり、入力力率 96.1%，出力電圧 THD は 6.2% となった。

(3) 昇圧モード時の制御手法と実験結果

電源電圧が低くなる電源異常に対しては、入力チョップパ部で負荷電力とバッテリー充電分電力を入力力率 1 の正弦波入力電流により電源から供給し、アクティブフィルタ部で出力電圧の補償を行う。

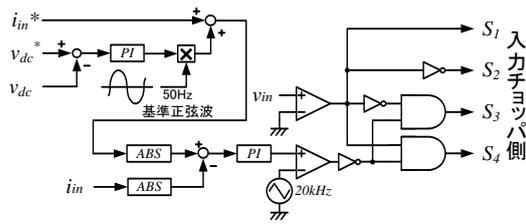


図7 昇圧モード時における入力チョップ制御ブロック図

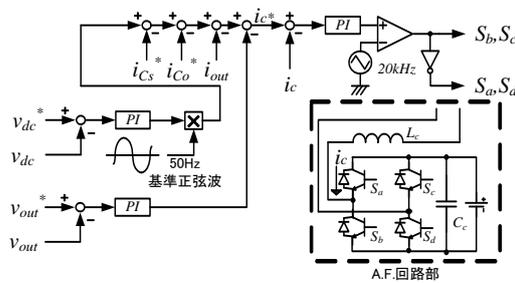


図8 昇圧モード時におけるアクティブフィルタ制御ブロック図

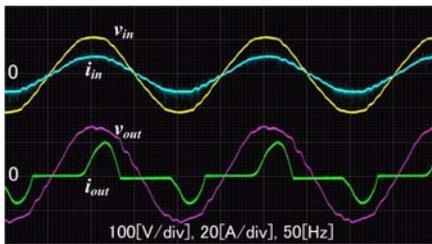


図9 昇圧モード時における実験結果

図7に昇圧モード時における入力チョップ制御ブロック図を示す。指令値は、瞬時出力電力から算出した基本入力電流指令値 i_{in}^* に、バッテリー電圧制御のために電圧指令値 V_{dc}^* と実際の V_{dc} の偏差を取り、PI 回路を介して電源電圧と同相波形に振幅変調したバッテリー充電電力分電流を加えることによって求められる。この指令値ならびに入力電流 i_{in} の絶対値をとり比較して偏差に PI 補償を施し、PWM 制御を施すことで S_3 と S_4 を PWM 動作させる信号としている。なお、 S_1 と S_2 は入力電圧の正負により切替えている。

図8に昇圧モード時のアクティブフィルタ制御ブロック図を示す。アクティブフィルタ制御は、所望の出力電圧の際に流れる出力フィルタコンデンサ電流 i_{Co}^* と負荷電流 i_{out} 、リンクコンデンサ電流 i_{Cs}^* を加えたものを出力電圧制御の基本補償電流指令値 i_c^* として、これに実際の i_c が追従するよう制御することを基本とする。

図9に昇圧モード時における整流器負荷時の実験結果を示す。電源電圧が 80Vrms に低

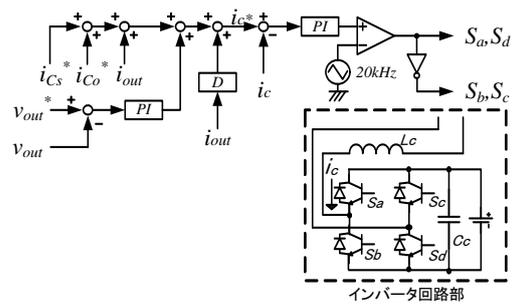


図10 停電モード時におけるインバータ制御ブロック図

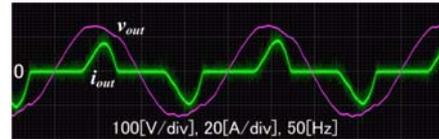


図11 停電モード時における実験結果

下した場合でも、出力電圧は 100Vrms に昇圧制御されていることが確認できる。また、出力電流が変動した際には、補償電流が適切に流れることで安定した電力を負荷側へと供給している。さらに、入力チョップによる入力電流の波形改善が行われていることも確認できる。入力電流は正弦波状で入力力率 98.0% となった。出力電圧についてもアクティブフィルタが補償電流を流して波形改善を行うことで正弦波状の出力電圧を維持している。

(4) 停電モード時の制御手法と実験結果

停電モードでは、入力側チョップの S_1 から S_4 が OFF して電源側回路を遮断すると共に、出力側チョップの S_b 、 S_c が ON、 S_a 、 S_d が OFF し、アクティブフィルタ側から負荷側へ通ずる回路を構成する。また、(1)～(3) でアクティブフィルタとして補償を行ってきた S_a ～ S_d が、単相インバータ制御を行うようスイッチングすることで、負荷側へこれまでと同様に電力を供給する。なお、入力チョップ側の OFF により電源と回路が切り離されるため、一般的な UPS に用いられるような遮断回路は必要ない。

停電モード時におけるインバータ制御ブロック図を図10に示す。所望の出力電圧が得られている時のリンク部のコンデンサ電流 i_{Cs}^* ならびに出力チョップ部のコンデンサ電流 i_{Co}^* 、そして負荷電流 i_{out} を足し合わせたものに実際の i_c が追従する制御を基本としている。

図11に停電モード時における整流器負荷時の実験結果を示す。停電時においては、そ

れまでアクティブフィルタとして動作していた回路がインバータとして動作し、負荷側へ安定した100Vrmsの電圧が供給されていることが確認できた。

以上の結果より、開発したUPSは、一般的な交流→直流→交流の2段階の電力変換を経ない、効率の高い交流→交流直接変換の回路構成でありながら、電源の変動に対して昇降圧制御による安定した出力電圧の供給が可能である。また、停電時にはインバータ動作による電力供給動作を行い、通常時はアクティブフィルタとして動作する電力変換器により電源力率は98%以上を確保できる。電源への高調波電流流入の抑制や高い回路利用率、入出力フィルタの小形化、電解コンデンサレスおよび絶縁トランスレスの特長を備える本方式UPSは新しいスタイルのUPSの一方式といえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

[1] Junji Shibata, Kazuhide Kaneko, Kiyoshi Ohishi, Itaru Ando, Mina Ogawa, Hiroshi Takano, "Fine Output Voltage Control Method considering Time-Delay of Digital Inverter System for X-ray Computed Tomography", 電気学会論文誌D, 査読有り, vol. 131, No. 11, pp. 1331-1337, 2011

[2] 進藤将太郎, 寺江悠太, 安東至, 大石潔, 小川美奈, 高野博司, 「負荷共振周波数追従制御に基づく単相高周波インバータの一構成法」, 電気学会論文誌D, 査読有り, vol. 131, No. 8, pp. 1078-1086, 2011

[学会発表] (計4件)

[1] 松橋正峻, 安東至, 芳賀仁, 大石潔, 「アクティブフィルタ機能を有する交流チョッパ式UPSの基本動作」, 第17回高専シンポジウム, 2012年1月28日, 崇城大学市民ホール

[2] 松橋正峻, 安東至, 芳賀仁, 大石潔, 「交流チョッパ式UPSの基本電力供給手法の開発」, 電気関係学会東北支部連合大会, 2010年8月26日, 八戸工業大学

[3] 進藤将太郎, 大石潔, 安東至, 小川美奈, 「周波数調整型位相シフト単相インバータの実験的検討」, 電気学会産業応用部門半導体電力変換研究会, 2010年1月30日, 同志社大学

[4] 柴田純司, 大石潔, 安東至, 小川美奈, 「スミス法を用いた無駄時間を含むインバータ制御系の実験的検討」, 電気学会産業応用部門半導体電力変換研究会, 2010年1月

30日, 同志社大学
[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安東 至 (ANDO ITARU)

秋田工業高等専門学校・電気情報工学科・教授

研究者番号: 20212665

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

大石 潔 (OHISHI KIYOSHI)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 40185187