712 電磁式補助人工心臓の駆動制御に関する研究

A Control for Optimal Driving of the Direct Electromagnetic Ventricular Assist Device

○福長 一義 (東京電機大)

Kazuyoshi FUKUNAGA, Tokyo Denki University, Hatoyamamachi, Hikigun, Saitama

大沼 健太郎 (東京電機大)

伊藤 洋平 (東京電機大)

住倉 博仁 (東京電機大)

Kentarou OHNUMA, Tokyo Denki University Youhei ITOH, Tokyo Denki University Hirohito SUMIKURA, Tokyo Denki University

舟久保 昭夫 (東京電機大)

福井 康裕 (東京電機大)

Akio FUNAKUBO, Tokyo Denki University

Yasuhiro FUKUI, Tokyo Denki University

This paper reports on the control system that drives the Direct Electromagnetic Ventricular Assist Device (DEM-VAD) which is currently under development. DEM-VAD driven by Linear Oscillatory Actuator (LOA) has the structure, which makes the pusher-plate attached to the Mover reciprocate directly. The principal feature of our LOA is that the thrust generated by the same input electric power differs according to the positions and the drive directions of the mover. The mover consists of permanent magnets, therefore in order to generate the control signal according to the pusher-plate position and the drive direction, the information on the position detected by the hall sensor was used. As a result of driving a pump in a mock circulatory system, the maximum pump rate in which full fill – full eject drive was possible were 167bpm in drive voltage 10V (Afterload 100mmHg, Preload 10mmHg). At this time, input power was 8.5W, pump output was 7.2 L/min, and efficiency was 18.9%. We tried to control the obstruction of the pump inlet occurred using change of slope of the hall sensor output voltage waveform. Consequently, the possibility was suggested of removing the obstruction of the pump inlet which occurred.

Key Words: *Linear Oscillatory Actuator, Ventricular Assist Device, Control*

1. はじめに

内科的治療では救命困難な重症心不全患者を治療する目的で心臓移植が行われている。1999 年より本邦においても脳死からの心臓移植が再開されたが、ドナー心臓の不足は深刻である。また、心臓移植待機患者の移植待機期間は長期化しており、補助人工心臓は、心臓移植までのブリッジとして重要な治療機器となっている。

本研究では、運動変換機構を用いずに往復運動が得られるリニア振動アクチュエータ(Linear Oscillatory Actuator: 以下 LOA)¹⁾を使用した電磁式補助人工心臓(Direct Electromagnetic Ventricular Assist Device: 以下 DEM-VAD)の開発を行っている。現在まで模擬循環回路による試作ポンプの評価を行ってきた²⁾。ポンプ評価のための DEM-VAD 駆動には駆動信号に正弦波のような固定波形を入力してきた。今後、動物実験や実用化に向けて完全充満・完全駆出(Full Fill / Full Eject: 以下 FF/FE)駆動等の制御が必要であると考えられた。そこで本研究では、DEM-VAD の駆動制御システムの開発を目的とする。

2. 方法

固定波形による駆動では、自然心臓の拍動下のような負荷が変動する条件での FF/FE 駆動が困難であると考えられた。また、脱血時に心室壁を吸い付けるなど流路に障害を生じる可能性が考えられた。そこで、計測が容易でポンプの駆動状態と関係が強いと考えられるプッシャープレートの位置情報をフィードバックすることにより駆動制御を行った。

LOA は、インバータ回路によって駆動信号に対応したスイッチングを行うことで駆動した。プレート位置に応じて生成した駆動信号は、パーソナルコンピュータおよびアナログ入出力可能な I/O ボード(DAQ card, National Instruments)を用いて出力した。

2-1 プッシャープレート位置の検出 DEM-VAD は、LOA の可動子によってプッシャープレートを直接往復運動させる特徴を有した。LOA の可動子は、永久磁石で構成されているため、ホール素子 (HW105A, 旭化成電子) を用いてプレート(可動子)の位置を検出した(図 1)。

2-2 制御方法 対象とした LOA は、同じ入力電力において、可動子の位置、駆動方向によって生じる推力が異なる²⁾。そこで、可動子の往復運動のストロークを駆出方向・充満方向でそれぞれ 8 段階に分割し、各位置・駆動方向に応じて駆動信号を生成した。ホールセンサ出力波形に完全充満、完全駆出時でそれぞれ閾値を設定して充満・駆出を切換えた(図 2-①)。また、完全充満・完全駆出直後にそれぞれ待機時間を設けることで、定拍動数駆動を可能とした(図 2-②)。

DEM-VAD はプッシャープレートが可動子に直接固定されており、能動的に充満する構造であるため、脱血時に心室壁を吸い付ける可能性がある。吸い付きが生じた際、脱血が困難となりプッシャープレートが停滞すると考えられたため、ホールセンサ出力波形の傾きの変化より吸い付きの判別を行った。吸い付きが生じた際の回復を期待し、プレート停滞時に駆動信号を駆出方向へ切り換え、その後一定時間待機した後再び充満・駆出を切り換える制御とした(図 2-③)。

3. 実験

本制御法を用いた駆動状態を検討するため、模擬循環回路を用いたポンプ駆動実験を行った。実験条件は、LOA の駆動電源電圧を 10V、前負荷を 10mmHg 一定とした。後負荷 100mmHg 一定で拍動数を変更したとき、拍動数 120bpm 一定で後負荷を変更したときの各条件でポンプを駆動した。

Fig.1 Detection of pusher-plate position

Fig.2 Operation of a control for DEM-VAD

脱血時の吸い付きを想定してポンプ駆動中に Inlet 側の流路を遮断する実験を行った。このとき流路の遮断部分とポンプ流入口の間の圧力を同時に測定した。

4. 結果

図3に従来より用いている固定波形による駆動状態およびプッシャープレートの位置・駆動方向に応じて制御を行った駆動状態の一例(拍動数 120bpm, 後負荷 100mmHg)を併せて示した。このとき、固定波形による駆動ではプレート位置が FF/FE に達した後再び充満・駆出が切り換わるまでの間、電流が流れ続けているのに対して制御を行った駆動では、FF/FE 後に定拍動数駆動のための待機時間があり、その間電流が流れていないことが示された。

図4に各条件における固定波形駆動および本制御法による駆動時の効率特性を示した。本実験の条件において拍動数 167bpm まで FF/FE 駆動が可能であった。また、このとき最大効率 18.9%、最大流量 7.2L/min を示した(入力電力 8.5W)。

脱血時の吸い付きを想定してポンプ Inlet 側の流路を遮断したときの駆動状態を図5に示した。図5より流入口の遮断に対して、図2③に示した制御法に従って動作したことが確認された。

5. 考察

図4より固定波形駆動に比べて、プッシャープレート位置・駆動方向に応じて制御したとき、一様に効率の改善が見られた。また、効率 13~19%程度で一定であったことから、拍動数の変更や後負荷の変化においても安定して駆動可能であると考えられた。

脱血時の吸い付きを想定した動作は、まず流路を遮断すると(図5①)、充満が困難となりプッシャープレートが停滞した。つぎに、ホールセンサ出力波形の傾きから吸い付きと判別し(図5②)、駆動信号を駆出方向に切換えている(図5③)。その後一定時間(本実験では1[sec])待機することで吸い付きが解除されることを期待している。このときポンプ流入部の圧力が陰圧から陽圧になっていることから(図5④)、本制御法で吸い付きが解除可能であると示唆された。

(1) Fixed signal

(2) Controlled signal

Fig.3 Drive characteristics of DEM-VAD (100mmHg, 120bpm)

(1) Constant afterload 100mmHg (2) Constant pump rate 120bpm

Fig.4 Efficiency characteristic

Fig.5 Dealing with the obstruction of the pump inlet occurred

6. まとめ

プッシャープレートの位置情報から、駆動信号を決定する制御システムを構築し、模擬循環回路を用いて駆動実験を行い、次の結果が得られた。

- (1) 前負荷 10mmHg、後負荷 100mmHg において FF/FE 駆動が可能な最大拍動数は 167bpm であった。このとき入力電力 8.5W、拍出量 7.2L/min、効率 18.9%を示した。
- (2) 本制御法による駆動で、固定波駆動と比べて一様に効率の改善がみられた。最大で 2.7 倍の効率の改善が見られた。また、拍動数の変更や後負荷の変化に対して固定波形と比べて安定した効率で駆動可能であると考えられた。
- (3) 模擬循環試験において、本制御によって吸い付きに対処可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 福長一義、舟久保昭夫、福井康裕: 補助人工心臓用リニア振動アクチュエータの提案と推力解析, 生体医工学, 40-4, 201/213(2002)
- 2) Kazuyoshi FUKUNAGA, Akio FUNAKUBO, Yasuhiro FUKUI: Newly Developed Ventricular Assist Device with Linear Oscillatory Actuator, ASAIO J., 49, 333/339 (2003)