

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2007-100704

(P2007-100704A)

(43) 公開日 平成19年4月19日(2007.4.19)

|                                      |                |             |
|--------------------------------------|----------------|-------------|
| (51) Int. Cl.                        | F I            | テーマコード (参考) |
| <b>FO2D 41/20 (2006.01)</b>          | FO2D 41/20 330 | 3G066       |
| <b>FO2M 47/00 (2006.01)</b>          | FO2M 47/00 E   | 3G301       |
| <b>FO2M 51/06 (2006.01)</b>          | FO2M 51/06 N   |             |
| <b>FO2M 51/00 (2006.01)</b>          | FO2M 51/00 A   |             |
| <b>HO1L 41/083 (2006.01)</b>         | HO1L 41/08 P   |             |
| 審査請求 未請求 請求項の数 14 O L 外国語出願 (全 32 頁) |                |             |

(21) 出願番号 特願2006-274965 (P2006-274965)  
 (22) 出願日 平成18年10月6日 (2006.10.6)  
 (31) 優先権主張番号 05256253.5  
 (32) 優先日 平成17年10月6日 (2005.10.6)  
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(71) 出願人 599023978  
 デルファイ・テクノロジーズ・インコーポ  
 レーテッド  
 アメリカ合衆国ミシガン州48098, ト  
 ロイ, デルファイ・ドライブ 5725  
 (74) 代理人 100099623  
 弁理士 奥山 尚一  
 (74) 代理人 100096769  
 弁理士 有原 幸一  
 (74) 代理人 100107319  
 弁理士 松島 鉄男  
 (72) 発明者 マーティン・ハーディ  
 イギリス国ケント州エムイー7・3キュー  
 ゼット, ギリンガム, ヘムステッド, シダ  
 ー・グローヴ 71

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 噴射制御方法

(57) 【要約】

【課題】 ノイズの問題を軽減又は排除するようにして、圧電式に操作可能な燃料噴射器を制御する方法を提供すること。

【解決手段】 噴射モードと非噴射モードとを有する燃料噴射器に用いられる圧電アクチュエータの充電と放電とを制御するための方法。この方法は、充電モード中に可変振幅の充電電流をアクチュエータに印加する段階と、放電モード中に可変振幅の放電電流をアクチュエータに印加する段階と、充電及び放電モード中に充電電流と放電電流とをそれぞれ監視する段階と、放電電流と充電電流とを監視された電流に応じて制御する段階と、監視された充電及び／又は放電電流を選択された電流波形と比較し、比較の結果に応じて、充電電流及び／又は放電電流を、オン及びオフに切替える段階とを含んでいる。好ましくは、選択された電流波形は、監視された充電電流及び／又は放電電流と比較するための最大閾値及び最小閾値をそれぞれ定める最大電流波形と最小電流波形とを含んでいる。

【選択図】 図4

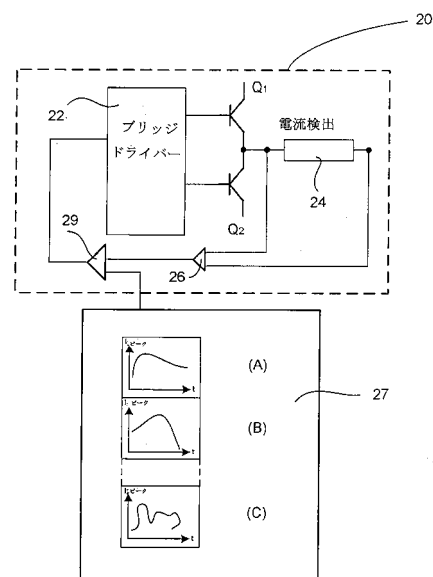


Fig. 4

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

噴射モード（12）と非噴射モード（16）とを有する燃料噴射器に用いられる圧電アクチュエータの充電と放電とを制御するための方法において、

充電モード（14）中に可変振幅の充電電流を前記アクチュエータに印加する段階と、  
放電モード（10）中に可変振幅の放電電流を前記アクチュエータに印加する段階と、  
前記充電及び放電モード（10、14）中に前記充電電流と放電電流とをそれぞれ監視する段階と、

前記放電電流と前記充電電流とを前記監視された電流に応じて制御する段階と、

前記監視された充電電流及び／又は放電電流を、選択された電流波形（ $I_{ピーク}$ 、 $\Delta I$ ； $I$  最小）と比較し、前記比較の結果に応じて、前記充電電流及び／又は放電電流を、オン及びオフに切替える段階と、  
を含むことを特徴とする方法。

10

## 【請求項 2】

前記選択された電流波形は、前記監視された充電電流及び／又は放電電流と、比較するための最大閾値及び最小閾値を、それぞれ定める最大電流波形（ $I_{ピーク}$ ）と最小電流波形（ $\Delta I$ ； $I$  最小）とを含むことを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

## 【請求項 3】

前記選択された電流波形（ $I_{ピーク}$ 、 $\Delta I$ ； $I$  最小）は、可変 PWM 周波数を放電電流に誘導するように選択されていることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の方法。

20

## 【請求項 4】

前記選択された電流波形（ $I_{ピーク}$ 、 $\Delta I$ ； $I$  最小）は、可変 PWM 周波数を放電電流に誘導するように選択されていることを特徴とする請求項 1～3 のいずれか一項に記載の方法。

## 【請求項 5】

噴射モード（12）と非噴射モード（16）とを有する燃料噴射器に用いられる圧電アクチュエータの充電と放電とを制御するための方法において、

充電モード（14）中に可変振幅の充電電流を前記アクチュエータに印加する段階であって、前記充電電流の前記振幅が第 1 PWM 周波数と共に変化するような段階と、

放電モード（10）中に可変振幅の放電電流を前記アクチュエータに印加する段階であって、前記放電電流の前記振幅が第 2 PWM 周波数と共に変化するような段階と、

30

前記充電及び放電モード（10、14）中に前記充電電流と前記放電電流とをそれぞれ監視する段階と、

前記放電電流と前記充電電流とを前記監視された電流に応じて制御する段階と、

前記放電モード（10）及び／又は前記充電モード（14）の全体を通して、前記 PWM 周波数を前記アクチュエータ内の共鳴モードを抑止するように変化させる段階と  
を含むことを特徴とする方法。

## 【請求項 6】

前記放電モード（10）の全体を通して、前記第 2 PWM 周波数を前記監視された放電電流に応じて調整する段階を含むことを特徴とする請求項 5 に記載の方法。

40

## 【請求項 7】

前記充電モード（14）の全体を通して、前記第 1 PWM 周波数を前記監視された充電電流に応じて調整する段階を含むことを特徴とする請求項 5 または 6 に記載の方法。

## 【請求項 8】

噴射行程を開始するために、前記アクチュエータを放電する段階を含むことを特徴とする請求項 5～7 のいずれか一項に記載の方法。

## 【請求項 9】

噴射行程を開始するために、前記アクチュエータを充電する段階を含むことを特徴とする請求項 5～7 のいずれか一項に記載の方法。

## 【請求項 10】

50

前記放電電流の振幅の前記第 2 PWM 周波数を変化させる段階は、

前記監視された放電電流を時間と共に可変である選択された電流波形（ $I_{\text{ピーク}}$ ）と比較し、前記比較の結果に応じて、前記放電電流をオン及びオフに切換え、可変 PWM 周波数を放電電流に誘導する段階を

含むことを特徴とする請求項 5～9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 1】

前記充電電流の振幅の前記第 1 PWM 周波数を変化させる段階は、

前記監視された充電電流を時間と共に可変である選択された電流波形（ $I_{\text{ピーク}}$ ）と比較し、前記比較の結果に応じて、前記充電電流をオン及びオフに切換え、可変 PWM 周波数を充電電流に誘導する段階を

含むことを特徴とする請求項 5～10 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 2】

前記選択された電流波形は、前記監視された充電電流及び／又は放電電流と比較するための最大閾値及び最小閾値を、それぞれ定めるピーク電流波形（ $I_{\text{ピーク}}$ ）と最小電流波形（ $\Delta I$ ； $I_{\text{最小}}$ ）とを含むことを特徴とする請求項 10 または 11 に記載の方法。

【請求項 1 3】

（i）前記非噴射モード（16）と前記放電モード（10）との間の遷移領域（28）、（ii）前記放電モード（10）と前記噴射モード（12）との間の遷移領域（30）、（iii）前記噴射モード（12）と前記充電モード（14）との間の遷移領域（32）、及び（iv）前記充電モード（14）と前記非噴射モード（16）との間の遷移領域（34）の 1 つ以上における電荷の移動率を、先行する充電及び／又は放電モード（10、14）中の電荷の移動率と比較して、遅延させる段階を含むことを特徴とする請求項 5～12 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 4】

（i）前記非噴射モード（16）と前記充電モード（10）との間の遷移領域、（ii）前記充電モード（14）と前記噴射モード（12）との間の遷移領域、（iii）前記噴射モード（12）と前記放電モード（10）との間の遷移領域、及び（iv）前記放電モード（10）と前記非噴射モード（16）との間の遷移領域の 1 つ以上における電荷の移動率を、先行する又は後に続く充電及び／又は放電モード（14、10）中の電荷の移動率と比較して、遅延させる段階を含むことを特徴とする請求項 5～12 のいずれか一項に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、燃料に関連するエンジンシリンダ又は燃焼空間に送達するための燃料噴射器を制御するための制御方法に関する。特に、本発明は、圧電アクチュエータによって作動される形式の燃料噴射器に関する。このような噴射器は、圧縮点火内燃機関用のコモンレール燃料噴射システムに広く用いられている。

【背景技術】

【0002】

既知のコモンレール燃料システムでは、コモンレールの形態にある蓄圧容積部に複数の関連する噴射器に送達するための高圧燃料を充填するために、高圧燃料ポンプが配置されている。各噴射器は、複数の噴射器出口を介する燃料噴射を制御するために、アクチュエータによってバルブシート（弁座）に向かって及びそこから離れるように移動可能であるニードル弁を備えている。

【0003】

ニードル弁の運動を駆動するのに圧電アクチュエータを用いることによって、特に良好な噴射器の性能が達成され得ることが、知られている。圧電アクチュエータは、圧電要素のスタックを備え、このスタックに、スタック長さを伸縮させるために、電圧が印加される。アクチュエータは、スタックが後退すると、噴射器のニードル弁がこのスタックの後

10

20

30

40

50

退と共に移動するように、ニードル弁に直接連結されるとよい。代替的に、スタックは、移動増幅器（例えば、流体増幅器）を介して、ニードル弁に連結されてもよい。他の噴射器では、圧電アクチュエータは、サーボ弁を介して、ニードル弁の移動を間接的に制御する。

#### 【0004】

圧電式に操作可能な燃料噴射器の一例が、本出願人による欧州登録特許第0995901号に記載されている。この場合の圧電アクチュエータは、ニードル弁の移動の可変増幅をもたらす流体的及び機械的連結要素を有する連結器を通して、ニードル弁に直接連結されている。

#### 【0005】

圧電アクチュエータは、迅速なニードル応答を与える高い力変化率を生成することができる。この観点から、直動圧電アクチュエータが組み込まれている噴射器は、特に有益である。しかし、直動圧電アクチュエータを用いる場合の1つの問題は、ニードル弁を移動させるために、アクチュエータからのより大きな機械力が必要とされることにある。このような大きな力、及び関連する高い力切換率は、噴射器を介して、関連するエンジンに伝達され、その結果、エンジン構造から望ましくないレベルの可聴ノイズを生じさせる。

#### 【発明の開示】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0006】

本発明の目的は、前述のノイズの問題を軽減又は排除するようにして、圧電式に操作可能な燃料噴射器を制御する方法を提供することにある。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0007】

本発明の第1態様によれば、噴射モードと非噴射モードとを有する燃料噴射器に用いられる圧電アクチュエータの充電と放電とを制御するための方法は、充電モード中に可変振幅の充電電流をアクチュエータに印加する段階であって、充電電流の振幅が第1PWM周波数と共に変化するような段階と、放電モード中に可変振幅の放電電流をアクチュエータに印加する段階であって、放電電流の振幅が第2PWM周波数と共に変化するような段階とを含んでいる。充電電流と放電電流の少なくとも1つは、充電及び放電モード中にそれぞれ監視され、監視された電流に応じて制御される。第1及び／又は第2PWM周波数は、充電モード及び／又は放電モードの全体を通して、アクチュエータ内の共鳴モードを抑止するように変化する。

#### 【0008】

PWM振幅、従って、駆動周波数は、充電及び放電モードの少なくとも1つの全体を通して可変（すなわち、不規則）なので、アクチュエータ内の共鳴効果による可聴ノイズの生成が抑止される。これは、一定の振幅／周波数のPWM駆動信号が用いられ、これがアクチュエータ又は噴射器内の共鳴モードを励起しがちである従来のPWM駆動方法を上回る利点をもたらす。この又は各PWM駆動周波数は、充電及び放電モード中に充電又は放電電流の振幅をそれぞれそのモードの全体を通して可変周波数を有するように意図的に制御することによって、変化する。

#### 【0009】

第2PWM周波数は、放電モードの全体を通して、監視された放電電流に応じて調整されるとよい。代替的又は追加的に、第1PWM周波数は、充電モードの全体を通して、監視された充電電流に応じて調整されるとよい。好ましくは、放電電流と充電電流の両方のPWM周波数が可変である。

#### 【0010】

放電モード中の第2PWM周波数は、放電モードにおける第1PWM周波数と同一の変動パターンに追従する必要はないが、追従することがあってもよい。

#### 【0011】

この方法は、放電－噴射式及び充電－噴射式の噴射器に適用可能である。換言すれば、

10

20

30

40

50

この方法は、噴射行程を開始するためにアクチュエータを放電するか又は噴射行程を開始するためにアクチュエータを充電するかのいずれかを含んでいるとよい。

【0012】

好ましい実施形態において、充電及び／又は放電電流の振幅の第1及び第2PWM周波数を変化させる段階は、監視された充電及び／又は放電電流を経時的に可変である選択された電流波形と比較する段階を含んでいる。選択された電流波形は、ピーク電流レベルを時間の関数として定め、充電及び／又は放電電流は、可変PWM周波数を充電及び／又は放電電流の振幅に誘導するために、監視された電流が選択された電流波形よりも小さいかどうか（又はピーク電流が正又は負であるかどうかによっては、大きいかどうか）に依存して、オン及びオフに切り換えられる。

10

【0013】

特に好ましい一実施形態において、選択された電流波形は、監視された充電及び／又は放電電流と比較するための最大及び最小閾値をそれぞれ定めるピーク電流波形と最小電流波形とを含んでいる。最小電流波形は、ピーク電流波形の所定の比率であってもよく、代替的に、（ピーク電流波形と同じになるようにも選択され得るが）、ピーク電流波形と無関係の代替的選択波形であってもよい。

【0014】

放電-噴射式の噴射器において、本方法は、好ましくは、（i）非噴射モードと放電モードとの間の遷移領域、（ii）放電モードと噴射モードとの間の遷移領域、（iii）噴射モードと充電モードとの間の遷移領域、及び（iv）充電モードと非噴射モードとの間の遷移領域の1つ以上における電荷の移動率を、先行する又は後に続く充電及び／又は放電モード中の電荷の移動率と比較して、遅延させる又は平滑にする段階を含んでいる。

20

【0015】

「遅延される」又は「平滑にされる」という用語は、電荷移動（電流）の比率が、先行する充電及び／又は放電モード中の電荷移動（電流）の比率と比較して、低減されることを意味している。

【0016】

本方法は、充電-噴射式の噴射器にも、同様に適用可能である。

【0017】

本発明の第2態様によれば、噴射モードと非噴射モードとを有する燃料噴射器に用いられる圧電アクチュエータの充電と放電とを制御するための方法が提供される。この方法は、充電モード中に可変振幅の充電電流をアクチュエータに印加する段階と、放電モード中に可変振幅の放電電流をアクチュエータに印加する段階と、充電及び放電モード中に充電電流と放電電流とをそれぞれ監視する段階と、放電電流と充電電流とを監視された電流に応じて制御する段階と、監視された充電及び／又は放電電流を、選択された電流波形と比較し、比較の結果に応じて、充電及び／又は放電電流を、オン及びオフに切り換える段階とを含んでいる。

30

【0018】

有利には、本発明は、平均充電電流及び／又は平均放電電流が、時間と共に実質的に連続的に変化することを可能とし、これによって、電荷が、スタックに、又はそこから移動される比率に対して高度の柔軟性をもたらす。

40

【0019】

選択された電流波形は、監視された、充電電流及び／又は放電電流、と比較するための最大閾値及び最小閾値を、それぞれ定める最大電流波形と最小電流波形とを含んでいるとよい。最大及び最小電流波形を適切に整形することによって、平均充電電流及び／又は平均放電電流を、アクチュエータの所望の変位率を得るのに必要とされるだけ変化させることができる。

【0020】

一実施形態において、最小電流波形は、最大電流波形の固定比率、例えば、50%に定

50

められる。しかし、これは、必ずしも必要ではなく、さらに他の実施形態では、最小電流波形は、最大電流波形とは無関係に決定、すなわち、整形される。

【0021】

アクチュエータに印加される、平均充電電流及び／又は平均放電電流、の制御の程度を高める利得に加えて、好ましい実施形態において、電流波形は、可変PWM周波数を放電電流に誘導するように選択される。

【0022】

本発明の第1態様の好ましい及び／又は任意選択的な特徴は、単独で、又は適切な組合せで、本発明の第2態様にもたらされてもよく、（及びその逆であってもよい）ことが理解されるだろう。

【0023】

以下、例示にすぎないが、本発明を添付の図面を参照して説明する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0024】

本発明によれば、駆動回路は、噴射ニードル弁用の圧電アクチュエータの操作を制御することによって、噴射器の開閉を制御する。圧電アクチュエータは、噴射器のニードル弁に連結された圧電要素のスタックを備え、この圧電スタックの両端の電荷（従って、電圧）を変化させることによって、スタックの長さを伸縮させ、従って、ニードル弁の動きを制御する。駆動回路は、圧電スタックの長さの正確な制御を可能にし、これによって、噴射器の開閉を制御し、燃料の正確な量を計量し、関連するエンジンシリンダ内にそれを噴射する。

【0025】

駆動回路は、圧電スタックがその長さを収縮するように放電される放電モードと、圧電スタックがその長さを伸張するように充電される充電モードで操作される。図1を参照すると、（10で示される）放電モード中、スタックの両端の電圧レベルは、最大電圧レベル（V充電）から最小電圧レベル（V放電）に減少し、その間の放電曲線に沿ったある点において、噴射器ニードルが開き、関連するエンジンシリンダ内への噴射を開始する。スタックが最小電圧レベルまで放電されたとき、噴射器は、噴射が生じる（ニードルが完全に持上げられた）噴射モードにある。この噴射モードは、総称的に12で示されている。

【0026】

噴射行程の必要とされる長さによって決定される所定の時間間隔の後、駆動回路は、ニードル弁の開鎖動作を開始するために、スタックを再充電するように操作される。（14で示される）充電モード中、スタックの両端の電圧は、最小電圧レベル（V放電）から最大電圧レベル（V放電）に増大される。スタックがV充電レベルに達したとき、噴射器は、噴射が生じない（ニードルが完全に閉鎖された）非噴射モードにある。この非噴射モードは、16で示されている。

【0027】

駆動回路が、PWM（パルス幅変調）制御信号を用いて、エネルギー（電荷）を圧電アクチュエータに及びそこから移動させることは、知られている。PWM駆動回路の例は、本出願人による同時係属中の欧州特許出願公開第1400676A号、国際特許出願公開第2005/028836号、及び本出願人による米国登録特許第6,760,212号に記載されている。

【0028】

PWM制御信号を実施することが効率の利得をもたらすことは分かっているが、本発明者らは、PWM制御を用いる欠点が、PWM信号の繰り返し特性に起因していることを見出した。図2を参照すると、破線10aは、放電モード10中の電圧レベルの拡大部を示している。放電モード12中、電圧は、一連の規則正しい間隔の電圧ステップによって、スタックから移行される。得られる電圧ステップ（電荷の移動間隔）の周波数は、駆動回路によって与えられるPWM制御信号の周波数によって決定される。電荷移動ステップの規則正しい周波数は、スタック内の共鳴モードの励起を強める傾向にあり、これによって

10

20

30

40

50

、共鳴効果がアクチュエータを介してエンジン構造に伝達されるので、可聴ノイズの生成をもたらす。

#### 【0029】

図3を参照すると、本発明は、可変（不規則）周波数のPWM信号を噴射行程の放電／充電モードの全体を通してもたらすことによって、前述の共鳴の問題に対処している。PWM充電及び放電ステップは、可変周波数で行なわれるので、圧電アクチュエータ内の共鳴モードの励起が低減される。全体の力変化は、スタックの放電又は充電において、実質的に変化しない。何故なら、これは、流体的及び／又は機械的運動の増幅、及びアクチュエータと噴射ニードル弁との間の剛性によって支配されるからである。また、電圧－時間特性の電圧勾配も変化しない。しかし、より無作為でより繰り返しの少ないPWM制御手法を実施することによって、アクチュエータ内の可聴ノイズの伝達が低減される。

10

#### 【0030】

図4は、圧電アクチュエータの可変PWM周波数の制御を実行するための総称的に20で示される駆動回路の一部を概略的に示している。駆動回路は、充電及び放電スイッチQ1及びQ2をそれぞれ制御するための半又は全Hブリッジ回路の形態にあるブリッジ駆動回路22を備えている。充電及び放電スイッチQ1、Q2は、これらのスイッチのいずれが作動されるかに依存して、電荷をアクチュエータスタックに又はそこから移動させるように、操作可能である。もし充電スイッチQ1が閉鎖され、放電スイッチQ2が開放されると、アクチュエータは、電荷が圧電スタックに移動される充電モードにある。もし充電スイッチQ1が開放され、放電スイッチQ2が閉鎖されると、アクチュエータは、電荷がスタックから移動される放電モードにある。もし充電及び放電スイッチQ1、Q2の両方が開放されると、アクチュエータは、充電も放電も行なわず、スタックがまさに放電又は充電されたかどうかによって、噴射又は非噴射モードのいずれかにある。スタックの充電及び放電は、スタックを流れる電流を制御することによって、制御される。もし充電スイッチが閉鎖されると、電流は、噴射器を充電する方向に流れ、もし放電スイッチが閉鎖されると、電流は、噴射器を放電する方向に流れる。

20

#### 【0031】

駆動回路20は、レジスタ24と、スタックを流れる電流（すなわち、電荷の変化率）を検出するための電流センサ26とを備える電流検出手段をさらに備えている。電流の測定値は、比較器29に供給される。この比較器29は、一入力端において測定された電流を受け、他の入力端において関連するマイクロプロセッサ27のメモリに記憶されている選択された電流波形（ $I_{\text{ピーク}}$ ）を受ける。3つの可能な電流波形が、例として、図4に示されているが、実際には、極めて多数の電流波形が、マイクロプロセッサのメモリに記憶されている。電流波形は、噴射器の駆動要件に従って、マイクロプロセッサ27内において選択される。比較器29は、電流波形を測定された電流と比較し、比較器の出力に依存して、ブリッジ駆動回路22を制御する。

30

#### 【0032】

さらに詳細には、放電操作を示す図3を再び参照すると、最初、放電スイッチQ2は、レジスタ24を通る放電電流が時間 $\Delta t$ において選択された電流波形によって定められる $I_{\text{ピーク}}$ を超えるまで（ $I_{\text{ピーク}}$ よりも負になるまで）、閉鎖されている。電流波形 $I_{\text{ピーク}}$ は、監視された電流と比較するための最大電流波形を時間の関数として定めている。この時点で、放電スイッチQ2は、測定された電流がピーク電流の $\Delta I$ よりも降下するまで（ $\Delta I$ よりも正になるまで）、開放される。ここで、ピーク電流よりも小さい $\Delta I$ の波形は、最小電流波形を時間の関数として定めている。典型的には、 $\Delta I$ は、 $I_{\text{ピーク}}$ の50%に設定されるが、噴射器の操作要件に依存して選択される可変量であってもよい。放電スイッチQ2の切換は、放電モードの全体を通して連続的に行なわれ、放電電流は、スタック長さの必要とされる縮小が達成されるまで、RMS電流値に維持される。このように、PWM制御周波数は、切換の周波数、従って、 $I_{\text{ピーク}}$ 電流波形によって、決定される。

40

#### 【0033】

50

前述の方法は、アクチュエータの充電中に可変PWM駆動周波数を電流の振幅に与えるために、充電モードにも適用される。

【0034】

図5は、 $I_{ピーク}$ 電流波形Aが選択された場合の図4に基づいて説明した方法における放電電流( $I_{放電}$ )を従来の制御方法における放電電流( $I_{従来}$ )と比較して示している。従来の制御方法を用いると、電流波形 $I_{ピーク}$ は、経時的に一定であり、放電電流の振幅のチョッピング周波数(PWM周波数)は、放電モードの全体を通して固定されている。しかし、本発明によれば、電流の振幅( $I_{放電}$ )は、放電モードを通して変化する周波数を有している。図5における図形は、図4における $I_{ピーク}$ 電流波形Aの最大値に向かって立ち上がる初期の部分のみを示していることが理解されるだろう。

10

【0035】

従来の方法と本発明の方法のいずれにおいても、RMS電流は、同じであり、(充電及び放電モードの全体を通して一定である)。しかし、電流波形 $I_{ピーク}$ の形状によって、放電電流が不規則又は可変周波数を有し、放電電流の振幅が、電流波形 $I_{ピーク}$ の形状に追従することが、本発明の方法の顕著な特徴である。

【0036】

他の実施形態では、最小電流波形をピーク電流波形 $I_{ピーク}$ の固定比率として定める代わりに、マイクロプロセッサ27のメモリに記憶されている複数の波形から選択することによって、最小電流波形を制御することができる。この制御方法の一例が、図6に示されているが、ここでは、電流波形 $I_{ピーク}$ (C)と $I_{最小}$ (D)が、切換段階中の可変振幅放電(又は充電)電流の限界を定めている。ここでも、RMS電流は、従来の方法におけるのと同じであるが、放電電流のPWM周波数は、限界値の $I_{ピーク}$ と $I_{最小}$ との間で変化するので、放電モードの全体を通して可変である。

20

【0037】

噴射行程の終端におけるスタックの充電は、スタックを平均充電電流に維持することによって、同様に実行される。選択される電流波形は、放電及び充電モードのいずれにおいても、同じであるとよく、又は代替的に、異なる $I_{ピーク}$ 電流波形が、充電モード中に選択されてもよい。

【0038】

実際には、適切な電流波形 $I_{ピーク}$ (例えば、A、B又はC)が、放出される可聴ノイズ及び動的応力を最小にし、ニードル弁アクチュエータシステムの流体的な応答と整合するように、選択される。また、電流波形を、ニードル弁の加速度と速度が目標値と一致して得られ、かつニードル弁の最大の持上げが所要の時間内で達成されるように、選択することも重要である。

30

【0039】

本発明の一実施形態では、可変PWM駆動周波数は、アクチュエータ操作の一部の期間においてのみ、例えば、アクチュエータ/噴射器の共鳴励起が好ましくない可聴ノイズレベルを生成する可能性が最も高いときにのみ、実行される。一例として、可変PWM駆動周波数は、可聴ノイズが決定的に重要な意味をもつ場合にのみ、実行されてもよい。例えば、低速かつ低負荷のアイドル状態において可聴ノイズを制限することが、特に重要である。

40

【0040】

さらに、可変PWM駆動周波数は、放電及び充電モードの両方において、実行されてもよく、又は代替的に、充電又は放電モードの一方又は他方でのみ、実行されてもよい。

【0041】

比較器29が、アクチュエータを可変PWM波形で駆動するために、選択された電流波形 $I_{ピーク}$ を測定された電流と比較することは、すでに述べたが、必ずしもこのようにする必要はなく、本発明は、比較器が、スタックを実質的に一定のPWM周波数で駆動するために、選択された電流波形 $I_{ピーク}$ を測定された電流と比較する場合を包含することが、理解されるべきである。この場合、PWM周波数は、実質的に一定に維持されるが、本

50



発明の方法によれば、R M S 充電又は放電電流が時間と共に連続的に可変とされるので、充電及び／又は放電モード中に電荷がスタックに又はそこから移動される比率に対して、高度の制御をもたらす。

#### 【0042】

図7を参照すると、本発明の代替的实施形態において、P W M 制御信号は、放電モードの開始時、放電モードの終了時、充電モードの開始時、及び充電モードの終了時における急峻な電圧変化が、これらの領域におけるスタックへの及びスタックからの電荷移動率を遅延させることによって、「緩和」又は「平滑」にされるように、さらに修正される。従来の方法では、これらの領域に生じる急峻な力の変化が、アクチュエータの共鳴モードを励起し、噴射器を介してエンジン構造に伝達される可聴ノイズレベルの一因となることが見出されている。力変化の領域間の遷移を平滑にすることによって、アクチュエータ内の共鳴、従って、可聴ノイズレベルも低減される。

#### 【0043】

最初の非噴射及び放電モードの間（すなわち、16と10との間）の遷移領域は、非噴射／放電遷移領域28と呼ばれ、放電及び噴射モードの間（すなわち、10と12との間）の遷移は、放電／噴射遷移領域30と呼ばれ、噴射及び充電モードの間（すなわち、12と14との間）の遷移領域は、噴射／充電遷移領域32と呼ばれ、充電及び非噴射モードの間（すなわち、14と16との間）の遷移領域は、充電／非噴射遷移領域34と呼ばれる。一例として、放電／噴射遷移領域30について、考える。P W M 駆動信号は、電荷の移動特性がこの領域30において連続的に平滑にされ、部分余弦又は正弦波関数の形状を取るように、修正されるとよい。これは、（破線によって示される）電荷移動率が（実線によって示される）従来の方法における電荷移動率と比較して低減されるように、アクチュエータを制御することによって、達成される。

#### 【0044】

同じ平滑化効果が、ノイズ低減の利得をもたらすために、非噴射／放電遷移領域28、噴射／充電遷移領域32、及び充電／非噴射遷移領域34にも適用される。いくつかの用途において、可聴ノイズレベルを低減させる目的では、充電／非噴射遷移領域34が、平滑効果を適用する最も重要な領域であり、非噴射／放電領域28も重要であることが分かっている。放電／噴射遷移領域30と噴射／充電遷移領域32における平滑化は、ノイズの低減には重要ではないが、アクチュエータの寿命に対する利点を有するので、好ましい実施形態では、4つの遷移領域の全てにおいて、電圧勾配が平滑にされる。

#### 【0045】

図4における駆動回路は、遷移領域における電流波形  $I_{\text{ピーク}}$  を適切に修正することによって電荷移動の平滑化を実行するのに、用いられる。電流波形は、遷移領域において、低減されたR M S 電流値、従って、低い電圧勾配（ $dV/dt$ ）を有するように、選択される。例えば、非噴射／放電遷移領域28における放電モードの開始時の短い期間に、R M S 電流が比較的低い値で始動し、その後、放電モードの主期間（すなわち、領域28と30との間の期間）中に一定のR M S 電流値まで徐々に増大するのを確実にするように、電流波形が修正される。

#### 【0046】

代替的实施（図示せず）において、P W M 駆動信号は、非噴射／放電遷移領域28、放電／噴射遷移領域30、噴射／充電遷移領域32、及び充電／非噴射遷移領域34のいずれかにおいて、電荷の移動率が、一連の小さい不連続なステップで非連続的に低減されるように、修正されてもよい。

#### 【0047】

本発明を放電－噴射モードで操作する噴射器に関して説明したが、本発明が充電－噴射モードで操作する噴射器にも同様に適用可能であることが理解されるだろう。同じように、これらの方法は、圧電アクチュエータがニードル弁の移動を制御するのにサーボ弁を制御する圧電式に操作可能な噴射器を含む、直接的又は間接的に作動する圧電噴射器にとっても、適切である。

10

20

30

40

50

【図面の簡単な説明】

【0048】

【図1】従来のPWM駆動波形によって制御される圧電噴射器における噴射行程用の電圧特性を例示する図である。

【図2】PWM駆動波形の性質をより明瞭に例示するために、図1の電圧特性を拡大して示す図である。

【図3】本発明の第1実施形態によって制御される圧電噴射器用の電圧特性の一部を拡大して示す図である。

【図4】図2及び3に基づいて説明した制御方法を実行するための駆動回路を示す図である。

【図5】選択された電流波形  $I_{ピーク}$  に基づく本発明の実施形態によるスタックを通る放電電流を従来の制御方法における放電電流と比較して示す図形である。

【図6】異なる電流波形  $I_{ピーク}$  が選択された場合のスタックを通る放電電流を示す図形である。

【図7】本発明の代替的实施形態によって制御される圧電噴射器における電圧特性を示す図である。

【符号の説明】

【0049】

- 10 放電モード
- 10a 拡大部
- 12 噴射モード
- 14 充電モード
- 16 非噴射モード
- 20 駆動回路
- 22 ブリッジ駆動回路
- 24 レジスタ
- 26 電流センサ
- 27 マイクロプロセッサ
- 28 非噴射／放電遷移領域
- 29 比較器
- 30 放電／噴射遷移領域
- 32 噴射／充電遷移領域
- 34 充電／非噴射遷移領域
- Q1 充電スイッチ
- Q2 放電スイッチ

10

20

30

【図 1】

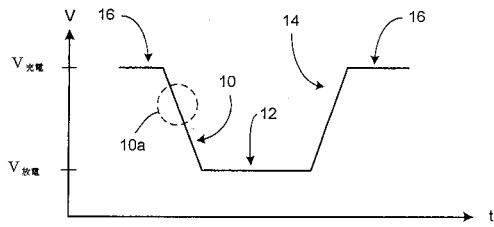


Fig. 1

【図 2】

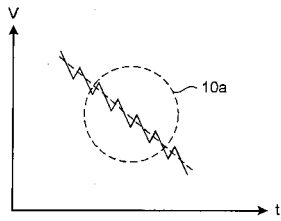


Fig. 2

【図 3】

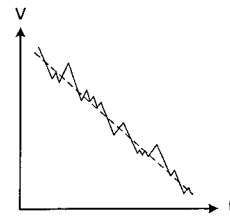


Fig. 3

【図 4】

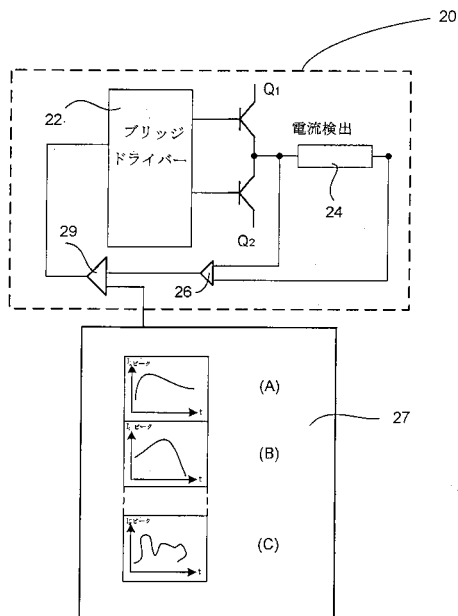


Fig. 4

【図 5】

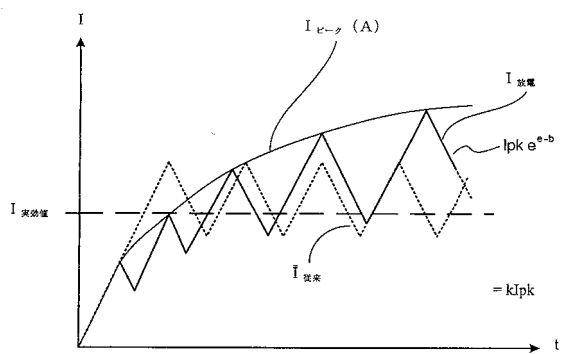


Fig. 5

【図 6】

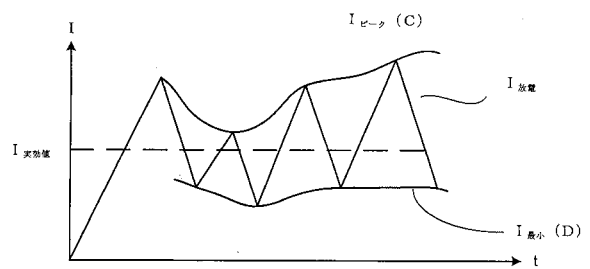


Fig. 6

【図 7】

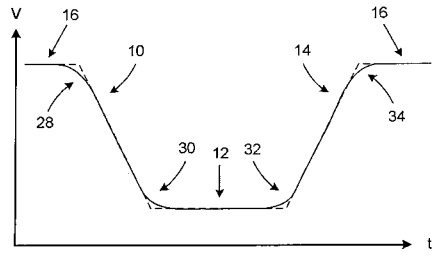


Fig. 7

---

フロントページの続き

- (72)発明者 グレアム・バルフォア  
イギリス国ミドルセックス州ティーダブリュー1 2・2エヌジー, ハンプトン, テューダー・ロード 4 9
- (72)発明者 ナイジェル・ベイカー  
イギリス国ケント州シーティー2・0エルティー, カンタベリー, スターリー, ラバーナム・レイン 2 5
- (72)発明者 ピーター・グリフィン  
イギリス国ケント州エムイー1 4・2イーユー, メイドストーン, ウッドランド・ウェイ, ザ・チャイムズ

Fターム(参考) 3G066 BA22 CC05U CE27 DA01  
3G301 JA37 LB11 LC05 LC10 NB07 PG02Z

【外国語明細書】

## **1. Title of Invention**

### **INJECTOR CONTROL METHOD**

## 5 **2. Detailed Explanation of the Invention**

### Technical Field

10 The present invention relates to a control method for controlling a fuel injector for delivering fuel to an associated engine cylinder or combustion space. In particular, the invention relates to a fuel injector of the type actuated by means of a piezoelectric actuator. Such injectors are used widely in common rail fuel injection systems for compression ignition internal combustion engines.

15

### Background of the Invention

In known common rail fuel systems, a high pressure fuel pump is arranged to charge an accumulator volume in the form of a common rail with fuel at high pressure for delivery  
20 to a plurality of associated injectors. Each injector includes a valve needle which is movable by means of an actuator, towards and away from a valve seat, to control fuel injection through a plurality of injector outlets.

It is known that particularly good injector performance can be achieved by using a  
25 piezoelectric actuator to drive movement of the valve needle. The piezoelectric actuator includes a stack of piezoelectric elements to which a voltage is applied to extend and contract the stack length. The actuator may be coupled directly to the valve needle so that, as the stack is retracted, the injector valve needle is caused to move with the stack retraction. Alternatively, the stack may be coupled to the valve needle via a motion  
30 amplifier (for example, a hydraulic amplifier). In other injectors the piezoelectric actuator controls valve needle movement indirectly through a servo valve.

One example of a piezoelectrically operable fuel injector is described in our granted European patent EP 0995901. The piezoelectric actuator in this case is coupled directly to the valve needle through a coupler having both hydraulic and mechanical coupling  
5 elements to provide variable amplification of movement of the valve needle.

Piezoelectric actuators are capable of generating high rates of force change which gives fast needle response. Injectors configured with direct-acting piezoelectric actuators are particularly beneficial in this regard. However, one problem with using a direct acting  
10 piezoelectric actuator is that a greater mechanical force is required from the actuator in order to move the valve needle. Such high forces, and the associated high rates of force switching, are transmitted through the injector to the associated engine and result in an undesirable level of audible noise from the engine structure.

15 It is an object of the present invention to provide a method of controlling a piezoelectrically operable fuel injector in a manner which alleviates or removes the aforementioned noise problem.

#### Summary of Invention

20

According to a first aspect of the present invention, a method for controlling charging and discharging of a piezoelectric actuator for use in fuel injector having an inject mode and a non-inject mode includes applying a charging current of variable amplitude to the actuator during a charge mode, wherein the amplitude of the charging current varies  
25 with a first PWM frequency, and applying a discharging current of variable amplitude to the actuator during a discharge mode, wherein the amplitude of the discharging current varies with a second PWM frequency. At least one of the charging current and the discharging current is monitored during the charge and discharge mode, respectively, and is controlled in response to the monitored current. The first and/or second PWM

frequency is varied throughout the charge mode and/or the discharge mode so as to suppress resonance modes within the actuator.

Because the PWM amplitude, and hence drive frequency, is variable (i.e. irregular) throughout at least one of the charge and discharge modes, the generation of audible noise due to resonance effects within the actuator is suppressed. This provides an advantage over conventional PWM drive methods where a constant amplitude/frequency PWM drive signal is used which tends to excite resonance modes within the actuator or the injector itself. The or each PWM drive frequency is varied by deliberately controlling the amplitude of the charging or discharging current during the charge and discharge mode, respectively, so as to have a variable frequency throughout the mode.

The second PWM frequency may be adjusted throughout the discharge mode in response to the monitored discharging current. Alternatively, or in addition, the first PWM frequency may be adjusted throughout the charge mode in response to the monitored charging current. Preferably, both the PWM frequency of the discharging current and of the charging current are variable.

The second PWM frequency during the discharge mode need not, but could, follow the same pattern of variation as the first PWM frequency in the discharge mode.

The method is applicable to injectors of the discharge-to-inject type and the charge-to-inject type. In other words, the method may involve either discharging the actuator in order to initiate an injection event or charging the actuator in order to initiate an injection event.

In a preferred embodiment, the step of varying the first and second PWM frequencies of the charging and/or discharging current amplitudes includes comparing the monitored charging and/or discharging current with a selected current waveform which is variable



over time. The selected current waveform defines a peak current level as a function of time and the charging and/or discharging current is switched on and off in dependence upon whether the monitored current is less than (or greater than, depending on whether the peak current level is positive or negative) the selected current waveform, so as to  
5 induce a variable PWM frequency to the charging and/or discharging current amplitude.

In one particularly preferred embodiment, the selected current waveform includes a peak current waveform and a minimum current waveform which define maximum and minimum thresholds, respectively, for comparison with the monitored charging and/or  
10 discharge current. The minimum current waveform may be a predetermined proportion of the peak current waveform or, alternatively, may be an alternative, selected waveform which is independent of (although could be selected to be the same as) the peak current waveform.

15 In a discharge-to-inject injector, the method preferably includes slowing or smoothing the rate of charge transfer within one or more of (i) a transition region between the non-inject mode and the discharge mode, (ii) a transition region between the discharge mode and the inject mode, (iii) a transition region between the inject mode and the charge mode, and (iv) a transition region between the charge mode and the non-inject mode in  
20 comparison with the rate of charge transfer during the preceding or subsequent charge and/or discharge mode.

By 'slowed' or 'smoothed' it is intended to mean that the rate of charge transfer (current) is reduced in comparison with the rate of charge transfer (current) during the  
25 preceding charge and/or discharge mode.

The method is equally applicable to a charge-to-inject injector.

According to a second aspect of the invention, there is provided a method for  
30 controlling charging and discharging of a piezoelectric actuator for use in a fuel injector

having an inject mode and a non-inject mode. The method comprises applying a charging current of variable amplitude to the actuator during a charge mode, applying a discharging current of variable amplitude to the actuator during a discharge mode, monitoring the charging current and the discharging current during the charge and  
5 discharge modes, respectively, controlling the discharging current and the charging current in response to the monitored current, and comparing the monitored charging and/or discharging current with a selected current waveform and switching the charging and/or discharging current on and off in response to the result of the comparison.

10 Advantageously, the invention enables the average charge and/or discharge current to be varied substantially continuously over time which provides a high degree of flexibility over the rate at which charge is transferred onto, or off of, the stack.

The selected current waveform may include a maximum current waveform and a  
15 minimum current waveform, which define maximum and minimum thresholds, respectively, for comparison with the monitored charging and/or discharge current. By appropriate shaping of the maximum and minimum current waveforms, the average charge and/or discharge current can be varied as required to implement a desired rate of displacement of the actuator.

20

In one embodiment, the minimum current waveform is defined as a fixed proportion of the maximum current waveform, for example fifty percent. However, this need not be the case and, in a further embodiment, the minimum current waveform is determined, or shaped, independently of the maximum current waveform.

25

In addition to the benefit of providing an increased degree of control of the average charging and/or discharging current that is applied to the actuator, in a preferred embodiment, the current waveform is selected so as to induce a variable PWM frequency to the discharging current.

30

It will be appreciated that preferred and/or optional features of the first aspect of the invention may be provided in the second aspect of the invention also (and vice versa), alone or in appropriate combination.

5

#### Brief Description of Drawings

The present invention will now be described, by way of example only, with reference to the accompanying drawings in which:

10

Figure 1 is a diagram to illustrate the voltage characteristic for an injection event in a piezoelectric injector controlled by means of a conventional PWM drive waveform,

15

Figure 2 shows a portion of the voltage characteristic in Figure 1 on an enlarged scale to illustrate the nature of the PWM drive waveform more clearly,

Figure 3 shows a portion of the voltage characteristic on an enlarged scale for a piezoelectric injector controlled in accordance with a first embodiment of the invention,

20

Figure 4 shows the drive circuit for implementing the control method described with reference to Figures 2 and 3,

25

Figure 5 is a graphical illustration of the discharge current through the stack for an embodiment of the present invention for a selected current waveform,  $I_{peak}$ , in comparison with the discharge current in a conventional control method,

Figure 6 is a graphical illustration of the discharge current through the stack where a different current waveform,  $I_{peak}$ , is selected, and

Figure 7 is a diagram to illustrate the voltage characteristic in a piezoelectric injector controlled in accordance with an alternative embodiment of the invention.

5     Detailed Description of Preferred Embodiments

In accordance with the present invention, a drive circuit controls the opening and closing of the injector by controlling operation of the piezoelectric actuator for the injector valve needle. The piezoelectric actuator includes a stack of piezoelectric  
10    elements which is coupled to the injector valve needle so that by varying the charge (and hence the voltage) across the piezoelectric stack, the length of the stack is caused to extend and contract, and hence valve needle movement is controlled. The drive circuit enables precise control over the length of the piezoelectric stack and so controls opening and closing of the injector to meter and inject precise amounts of fuel into the associated  
15    engine cylinder.

The drive circuit operates in a discharge mode, in which the piezoelectric stack is discharged to contract its length, and a charge mode, in which the piezoelectric stack is charged to increase its length. Referring to Figure 1, during the discharge mode  
20    (identified as 10) the voltage level across the stack is reduced from a maximum voltage level ( $V_{charge}$ ) to a minimum voltage level ( $V_{discharge}$ ) until, at some point along the discharge curve, the injector needle is caused to open so as to initiate injection into the associated engine cylinder. When the stack is discharged to the minimum voltage level the injector is in an inject mode (full needle lift) in which injection occurs. The inject  
25    mode is identified generally as 12.

After a predetermined time interval determined by the required length of the injection event, the drive circuit operates to re-charge the stack so as to initiate valve needle closing movement. During the charge mode (identified at 14) the voltage across the  
30    stack is increased from the minimum voltage level ( $V_{discharge}$ ) to the maximum

voltage level (Vcharge). When the stack reaches the Vcharge level the injector is in a non-inject mode (needle fully closed) in which no injection occurs. The non-inject mode is identified at 16.

- 5 It is known for the drive circuit to transfer energy (charge) to and from the piezoelectric actuator using a PWM (pulse width modulation) control signal. Examples of PWM drive circuits are described in our co-pending patent applications EP 1 400 676 A and WO 2005/028836 and in our granted US patent, US 6 760 212.
- 10 Although the implementation of a PWM control signal has been found to provide efficiency benefits, the inventors have now found that a drawback of using PWM control arises from the repetitive nature of the PWM signal. Referring to Figure 2, the dashed line 10a shows an enlarged portion of the voltage level during the discharge mode 10. During the discharge mode 12 the voltage is transferred from the stack by
- 15 means of a series of regularly spaced voltage steps. The frequency of the resulting voltage steps (charge transfer intervals) is determined by the frequency of the PWM control signal provided by the drive circuit. The regular frequency of the charge transfer steps tends to reinforce excitement of resonant modes within the stack, which in turn leads to the generation of audible noise as the resonance effect is transmitted through the
- 20 actuator to the engine structure.

Referring to Figure 3, the present invention addresses the aforementioned resonance problem by providing a PWM control signal of variable (irregular) frequency throughout the discharge/charge mode of an injection event. As the PWM charge and discharge

25 steps occur with a variable frequency the excitement of resonant modes within the piezoelectric actuator is reduced. The total force change remains substantially unchanged in discharging or charging the stack as this is governed by the hydraulic and/or mechanical motion amplification and stiffness between the actuator and the injector valve needle, and the average gradient of the voltage-time characteristic also

remains unaltered. However, in implementing a more random and less repetitive PWM control strategy the transmission of audible noise within the actuator is reduced.

Figure 4 illustrates schematically a section of a drive circuit, referred to generally as 20,  
5 for implementing variable PWM frequency control of the piezoelectric actuator. The drive circuit includes a bridge driver circuit 22, in the form of a half or full H-bridge circuit, for controlling charge and discharge switches, Q1 and Q2 respectively. The charge and discharge switches Q1, Q2 are operable so as to allow charge to be transferred to, or transferred from, the actuator stack depending on which of the  
10 switches is activated. If the charge switch Q1 is closed and the discharge switch Q2 is open, the actuator is in the charge mode during which charge is transferred onto the piezoelectric stack. If the charge switch Q1 is open and the discharge switch Q2 is closed, the actuator is in the discharge mode during which charge is transferred from the stack. If both the charge and the discharge switches Q1, Q2 are open the actuator is  
15 neither charging nor discharging and so the injector is in either the inject or the non-inject mode, depending on whether the stack has just been discharged or charged. Charging and discharging of the stack is controlled by controlling the current flow through the stack: if the charging switch is closed the current flow is in a direction to charge the injector and if the discharging switch is closed the current flow is in a  
20 direction to discharge the injector.

The drive circuit 20 further includes a current sensing means including a resistor 24 and a current sensor 26 for sensing the current flow (i.e. rate of change of charge) through the stack. The current measurement is supplied to a comparator 29 which receives, at  
25 one input, the measured current and, at its other input, a selected current waveform (I<sub>peak</sub>) which is stored in the memory of an associated microprocessor 27. Three possible current waveforms are identified in Figure 4 by way of illustration, although in practice a much higher number of current waveforms will be stored in the microprocessor memory. The current waveform is selected in the microprocessor 27 in  
30 accordance with the injector drive requirements. The comparator 29 compares the

current waveform with the measured current and controls the bridge driver circuit 22 depending on the comparator output.

More specifically, referring again to Figure 3 which shows the discharge operation, initially the discharge switch Q2 is held closed until the discharge current through the resistor 24 exceeds (more negative than)  $I_{peak}$ , as defined by the selected current waveform at time  $\Delta t$ . The current waveform  $I_{peak}$  defines the maximum current waveform as a function of time for comparison with the monitored current. At this point the discharge switch Q2 is opened until the measured current falls below (more positive than)  $\Delta I$  of the peak current, where  $\Delta I$  below the peak current waveform defines a minimum current waveform as a function of time. Typically,  $\Delta I$  is set at 50% of  $I_{peak}$ , although  $\Delta I$  may be a variable amount which is selected in dependence upon the injector operating requirements. The switching of the discharge switch Q2 continues throughout the discharge mode, with the discharge current being maintained at an RMS current value until the required reduction in stack length is achieved. In this way the PWM control frequency is determined by the frequency of the switching, and hence by the  $I_{peak}$  current waveform.

The above-described method is applied to the charge mode also so as to impart a variable PWM drive frequency to the current amplitude during actuator charging.

Figure 5 shows the discharge current ( $I_{discharge}$ ) for the method described with reference to Figure 4 where the  $I_{peak}$  current waveform, A, is selected, in comparison with the discharge current ( $I_{conv}$ ) for the conventional control method. Using the conventional control method, the current waveform  $I_{peak}$  is a constant with time so that the chopping frequency (PWM frequency) of the discharge current amplitude is fixed throughout the discharge mode. However, in the present invention the current amplitude ( $I_{discharge}$ ) has a frequency that varies through the discharge mode. It will be appreciated that the graphical illustration in Figure 5 shows only the initial portion of the  $I_{peak}$  current waveform, A, in Figure 4, as it rises towards its maximum value.

In both the conventional method and the method of the invention the RMS current is the same (and constant throughout the charge and discharge modes). However, it is a distinguishing feature of the method of the present invention that, because of the shape  
5 of the current waveform  $I_{peak}$ , the discharge current has an irregular or variable frequency, with the amplitude of the discharge current following the shape of the current waveform  $I_{peak}$ .

In another embodiment, rather than defining the minimum current waveform as a fixed  
10 proportion of the peak current waveform  $I_{peak}$ , the minimum current waveform may itself be controlled by selecting from a plurality of waveforms stored in the memory of the microprocessor 27. An example of this control method is shown in Figure 6, where current waveforms  $I_{peak}$  (C) and  $I_{min}$  (D) define the limits of the variable amplitude discharge (or charge) current during the switching phase. Again, the RMS current is the  
15 same as in the conventional method, but the PWM frequency of the discharge current is variable throughout the discharge mode as it varies between the  $I_{peak}$  and  $I_{min}$  limits.

Charging of the stack at the end of an injection event is carried out in a similar way, by maintaining the stack at a mean charging current. The selected current waveform may be  
20 the same during both the discharge and charge modes, or alternatively a different  $I_{peak}$  current waveform may be selected during the charge mode.

In practice, the appropriate current waveform  $I_{peak}$  (e.g. A, B or C) is selected to be that which minimises emitted audible noise and dynamic stress and is consistent with the  
25 hydraulic response of the valve needle actuator system. It is also important to select the current waveform so that valve needle acceleration and velocity are achievable, in accordance with target values, and so that maximum lift of the valve needle is achieved within the required timescale.



In one embodiment of the invention, the variable PWM drive frequency is only implemented during certain stages of actuator operation, for example when resonant excitation of the actuator/injector is most likely to generate unsatisfactory audible noise levels. By way of example, it may be that the variable PWM drive frequency need only  
5 be implemented for events for which audible noise is critical. For example, it is particularly important to limit audible noise under idle conditions, at low speed and low load.

Furthermore, a variable PWM drive frequency may be implemented during both the  
10 discharge and the charge modes, or alternatively may be implemented during only one or the other of the charge or discharge modes.

Although it is described above that the comparator 29 compares the selected current waveform  $I_{peak}$  with the measured current in order to drive the actuator with a variable  
15 PWM waveform, it should be appreciated that this need not be the case and the invention encompasses circumstances in which the comparator compares a selected current waveform  $I_{peak}$  with the measured current to drive the stack with a substantially constant PWM frequency. In such circumstances, although the PWM frequency remains substantially constant, the method of the invention permits the RMS charge or discharge  
20 current to be continuously variable over time which provides a high degree of control over the rate at which charge is transferred onto, and off of, the stack during the charge and/or discharge mode.

Referring to Figure 7, in an alternative embodiment of the invention the PWM control  
25 signal is further modified so that the abrupt voltage change at the start of the discharge mode, at the end of the discharge mode, at the start of the charge mode and at the end of the charge mode is 'softened' or 'smoothed' by slowing the rate of charge transfer to and from the stack in these regions. It has been observed that the abrupt force change which occurs in these regions in conventional methods excites resonance modes of the  
30 actuator which contribute to the audible noise level transmitted through the injector to

the engine structure. By smoothing the transition between regions of force change, resonance within the actuator is reduced and so too is the audible noise level.

The transition region between the initial non-inject and discharge modes (i.e. between 5 16 and 10) is referred to as the non-inject/discharge transition region 28, the transition between the discharge and inject modes (i.e. between 10 and 12) is referred to as the discharge/inject transition region 30, the transition region between the inject and charge modes (i.e. 12 and 14) is referred to as the inject/charge transition region 32 and the transition region between the charge and non-inject modes (i.e. 14 and 16) is referred to as the charge/non-inject transition region 34. By way of example, consider the 10 discharge/inject transition region 30. The PWM drive signal may be modified so that the charge transfer characteristic is smoothed continuously in this region 30 so that it takes the form of a part co-sine or sine-wave function. This is achieved by controlling the actuator so that the charge transfer rate (as indicated by the dashed line) is reduced in 15 comparison with the charge transfer rate for the conventional method (as indicated by the solid line).

The same smoothing effect is also applied in the non-inject/discharge transition region 28, the inject/charge transition region 32 and the charge/non-inject transition region 34 20 to contribute to the noise reduction benefits. It has been found that, for some applications, for the purpose of reducing the audible noise level the charge/non-inject transition region 34 is the most important region in which to apply a smoothing effect, with the non-inject/discharge region 28 also being important. Smoothing in the discharge/inject transition region 30 and in the inject/charge transition region 32 is less 25 critical for noise reduction but nonetheless still has advantages for actuator life, so in a preferred embodiment the voltage gradient is smoothed in all four transition regions.

The drive circuit in Figure 4 is used to implement charge transfer smoothing by appropriate modification of the current waveform,  $I_{peak}$ , in the transition region(s). The 30 current waveform is selected so as to have a reduced RMS current value in the transition

region(s), resulting in a lower voltage gradient ( $dV/dt$ ). So, for example, for a short period of time at the start of the discharge mode, in the non-inject/discharge transition region 28, the current waveform is modified so as to ensure the RMS current starts at a relatively low value before gradually increasing to the constant RMS current value  
5 through the main period of the discharge mode (i.e. the period between regions 28 and 30).

In an alternative implementation (not illustrated), the PWM drive signal may be modified so that charge transfer rate is reduced in a discontinuous manner, through a  
10 series of small discrete steps, in any of the non-inject/discharge transition region 28, the discharge/inject transition region 30, the inject/charge transition region 32 and the charge/non-inject transition region 34.

It will be appreciated that although the invention has been described in relation to an  
15 injector operating in a discharge-to-inject mode, the invention is equally applicable to injectors operating in a charge-to-inject mode. Likewise, the methods are relevant to direct or indirect acting piezoelectric injectors, including piezoelectrically operable injectors in which the piezoelectric actuator controls a servo valve to control movement of the valve needle.

1. A method for controlling charging and discharging of a piezoelectric actuator for use in a fuel injector having an inject mode (12) and a non-inject mode (16); the method  
5 comprising:  
  
applying a charging current of variable amplitude to the actuator during a charge mode (14),  
  
10 applying a discharging current of variable amplitude to the actuator during a discharge mode (10),  
  
monitoring the charging current and the discharging current during the charge and discharge modes (10, 14), respectively,  
15 controlling the discharging current and the charging current in response to the monitored current, and  
  
comparing the monitored charging and/or discharging current with a selected current  
20 waveform ( $I_{peak}$ ,  $\Delta I$ ;  $I_{min}$ ) and switching the charging and/or discharging current on and off in response to the result of the comparison.  
  
2. The method as claimed in claim 1, wherein the selected current waveform includes a maximum current waveform ( $I_{peak}$ ) and a minimum current waveform ( $\Delta I$ ;  
25  $I_{min}$ ), which define maximum and minimum thresholds, respectively, for comparison with the monitored charging and/or discharge current.  
  
3. The method as claimed in claim 1 or claim 2, wherein the selected current waveform ( $I_{peak}$ ,  $\Delta I$ ;  $I_{min}$ ) is selected so as to induce a variable PWM frequency to the  
30 discharging current.

4. The method as claimed any of claims 1 to 3, wherein the selected current waveform ( $I_{\text{peak}}$ ,  $\Delta I$ ;  $I_{\text{min}}$ ) is selected so as to induce a variable PWM frequency to the discharging current.

5 5. A method for controlling charging and discharging of a piezoelectric actuator for use in a fuel injector having an inject mode (12) and a non-inject mode (16); the method comprising:

applying a charging current of variable amplitude to the actuator during a charge mode  
10 (14), wherein the amplitude of the charging current varies with a first PWM frequency,

applying a discharging current of variable amplitude to the actuator during a discharge mode (10), wherein the amplitude of the discharging current varies with a second PWM frequency,  
15

monitoring the charging current and the discharging current during the charge and discharge modes (10, 14), respectively,

controlling the discharging current and the charging current in response to the monitored  
20 current, and

varying the PWM frequency throughout the discharge mode (10) and/or the charge mode (14) so as to suppress resonance modes within the actuator.

25 6. The method as claimed in claim 5, including:

adjusting the second PWM frequency throughout the discharge mode (10) in response to the monitored discharging current.

30 7. The method as claimed in claim 5 or claim 6, including:

adjusting the first PWM frequency throughout the charge mode (14) in response to the monitored charging current.

5 8. The method as claimed in any one of claims 5 to 7, including discharging the actuator in order to initiate an injection event.

9. The method as claimed in any one of claims 5 to 7, including charging the actuator in order to initiate an injection event.

10

10. The method as claimed in any one of claims 5 to 9, wherein varying the second PWM frequency of the discharging current amplitude includes:

15 comparing the monitored discharging current with a selected current waveform ( $I_{peak}$ ) which is variable over time and switching the discharging current on and off in response to the result of the comparison, so as to induce a variable PWM frequency to the discharging current.

11. The method as claimed in any one of claims 5 to 10, wherein varying the first  
20 PWM frequency of the charging current amplitude includes:

25 comparing the monitored charging current with a selected current waveform ( $I_{peak}$ ) which is variable over time and switching the charging current on and off in response to the result of the comparison, so as to induce a variable PWM frequency to the charging current.

12. The method as claimed in claim 10 or claim 11, wherein the selected current waveform includes a peak current waveform ( $I_{peak}$ ) and a minimum current waveform ( $\Delta I$ ;  $I_{min}$ ) which define maximum and minimum thresholds, respectively, for  
30 comparison with the monitored charging and/or discharge current.

13. The method as claimed in any one of claims 5 to 12, including slowing the rate of charge transfer within one or more of (i) a transition region (28) between the non-inject mode (16) and the discharge mode (10), (ii) a transition region (30) between the discharge mode (10) and the inject mode (12), (iii) a transition region (32) between the inject mode (12) and the charge mode (14), and (iv) a transition region (34) between the charge mode (14) and the non-inject mode (16), in comparison with the rate of charge transfer during a preceding charge and/or discharge mode (10, 14).

14. The method as claimed in any one of claims 5 to 12, including slowing the rate of charge transfer within one or more of (i) a transition region between the non-inject mode (16) and the charge mode (10), (ii) a transition region between the charge mode (14) and the inject mode (12) (iii) a transition region between the inject mode (12) and the discharge mode (10) and (iv) a transition region between the discharge mode (10) and the non-inject mode (16), in comparison with the rate of charge transfer during the preceding or subsequent charge and/or discharge mode (14, 10).

## **1. ABSTRACT**

5 A method for controlling charging and discharging of a piezoelectric actuator for use in a fuel injector having an inject mode and a non-inject mode. The method comprises applying a charging current of variable amplitude to the actuator during a charge mode, applying a discharging current of variable amplitude to the actuator during a discharge mode, monitoring the charging current and the discharging current during the charge and discharge modes, respectively, controlling the discharging current and the charging current in response to the monitored current, and comparing the monitored charging and/or discharging current with a selected current waveform and switching the charging and/or discharging current on and off in response to the result of the comparison. Preferably, the selected current waveform includes a maximum current waveform and a minimum current waveform, which define maximum and minimum thresholds, respectively, for comparison with the monitored charging and/or discharge current.

