

氏 名 OMET MATHIEW

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1712 号

学位授与の日付 平成26年9月29日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Digital Low Level RF Control Techniques and Procedures
Towards the International Linear Collider

論文審査委員 主 査 教授 加古 永治
教授 道園 真一郎
教授 山口 誠哉
准教授 梅森 健成
准教授 松本 利広
副主任研究員 青 寛幸 J-PARC センター

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

国際リニアコライダー (ILC) のためのデジタル低電力高周波源の制御技術に関する研究である。ILC 加速器では大電力高周波源であるクライストロンからの高周波出力を 39 台の超伝導空洞に入力しビーム加速を行う。高速のデジタル機器を用いたデジタルフィードバックと呼ばれる帰還制御が行われる予定であるが、いくつかの課題があった。

一つは超伝導空洞の加速電界制御の問題である。超伝導空洞を高電界で運転するとある閾値電界で常伝導状態に遷移するクエンチという現象がある。閾値は空洞毎に異なるが、空洞を最大限活かすために個々の空洞を超伝導状態の最大電界値に近くで運転することが計画されている。これを実現するためには、超伝導空洞への入力電力 (P_k) だけでなく空洞の負荷 Q 値 (Q_1) についても最適化する $P_k Q_1$ 制御を行う必要がある。これまでビーム電流の整合条件が複雑であることから実証がなされていなかったが、KEK の STF 施設を使って世界で初めて $P_k Q_1$ の実証試験を行った。また、この手法を、39 空洞の運転に適用するシミュレーションを実験結果に基づいて行い、空洞をクエンチに至らせずビーム運転を行う手法を確立させた。

二つ目の課題は、この超伝導空洞の $P_k Q_1$ 制御の過程で極めて高い Q_1 値 (1×10^7 程度) の空洞を運転しなくてはならないということである。このような高い Q_1 値の場合は、空洞の帯域は 60Hz 程度となり、振動などに起因する小さな空洞の変形 (マイクロフォニックスと呼ばれる) でも空洞の離調が変化してしまう問題があった。今回はさらに高い Q_1 値 (2×10^7) においても精度のよい校正を行ったうえでデジタルフィードバックを行えば空洞の運転が可能であることを実証した。

もう一つの課題は、非線形デバイスであるクライストロンを飽和点近くで運転する点である。超伝導空洞の制御では、ビーム補償などの為に急激なクライストロン出力の変更が必要とされることがあり、一般に適用されている帰還回路を用いた線形化の手法はシステムの不安定化につながった。これを避けるためにデジタル制御系の中に信号変換を組み込むことが提案されていた。個別に開発を進めてきた DESY, FNAL, KEK の研究を共同研究の一環として比較検討し、現在のデジタルシステムに適合するもっとも効率的な線形化手法をまとめた。

これらの成果により、ILC の高周波源制御における懸案をほぼ解決することができた。

Mathieu OMET氏の論文は、国際リニアコライダー（ILC）のためのデジタル低電力高周波源の制御技術に関するものである。ILC加速器では大電力高周波源であるクライストロンをビーム加速に用いるが、ここでは3つの大きな課題があった。一つは超伝導空洞の加速電界制御の問題である。1台のクライストロンで様々な加速電界（ $31.5\text{MV/m} \pm 20\%$ ）の超伝導空洞を励振するが、これまでに行われてきた空洞への入力電力のみを最適化する方法では、ビーム負荷時に高電界空洞の加速電界がさらに上がる（低電界空洞の加速電界は下がる）という問題がある。ILCでは超伝導空洞を最大加速電界（クエンチリミット）近くで運転する必要があるが、このためには超伝導空洞への入力電力（ P_k ）だけでなく空洞の負荷 Q 値（ Q_1 ）についても最適化することが要求される。この $P_k Q_1$ 制御は概念的には提案されていたが、空洞入力電力 P_k 、負荷 Q 値とビーム電流の整合条件が複雑であることから実証がなされていなかった。これについては、KEKのSTF施設を使って世界で初めて $P_k Q_1$ の実証試験に成功した。また、この実験結果をもとに実際のILCで使用する1台のクライストロンあたり39台の超伝導空洞の制御についても制御アルゴリズムを作成したうえで、シミュレーションによって制御可能であることを示した。さらに、ILCのような多空洞運転では自動化が重要となるが、これも実証試験とシミュレーションにより筋道を示している。

2番目は高い負荷 Q 値（ 2×10^7 、帯域32Hzに相当）での運転である。ILCでは先の $P_k Q_1$ 制御のためにこれまでのパルス運転での経験値である 3×10^6 より4倍程度高い負荷 Q 値での運転が想定されているが、帯域が狭いため持続的な運転が可能かどうかを確かめる必要があった。STFにおいて、実際に6mA程度のビーム（ILCでのビーム電流と同じ条件）で安定に長時間運転できることを実証した。

3番目の課題は、非線形デバイスであるクライストロンを飽和点近くで運転する点である。これを行うにはクライストロン入出力特性を線形化する必要があった。通常線形化には帰還回路を用いるが、加速器で使用するクライストロンは、高周波パルス内でビーム補償などがあり高速応答が求められることが多く、帰還回路を使った線形化では動作が不安定になることから、この手法は適用できなかった。近年のLLRFにおけるデジタルデバイスの大容量化で、クライストロンへの入力信号を変調することが可能になってきた。今回の線形化は、帰還回路型ではなく、クライストロンへの入力を変調させ出力が線形になるようにする方法をとった。今回のOMET氏の研究はクライストロン線形化について、個別に開発を進めてきたDESY, FNAL, KEKの研究を共同研究の一環として、比較検討し、現在のデジタルシステムに適合するもっとも効率的な線形化手法について研究を行ったものであり、ILCでの実用化に目途を立てた。

本研究は、OMET氏が、FNALやDESYとも共同研究を行った成果である。研究結果については、 $P_k Q_1$ 制御についてはPhysical Review Special Topicsで出版されている（PRST, Vol.17 (2014) 072003）。また、クライストロン線形化についてもNuclear Instruments and Methods Aに投稿中である。

以上により、本審査委員会は全会一致で、Mathieu OMET氏の論文は博士論文として十分な内容であり、合格と判断する。