

氏 名 Baiting DU

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2182 号

学位授与の日付 2020 年 9 月 28 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 Development of a Compact Local Power Distribution System
for the International Linear Collider

論文審査委員 主 査 教授 松本 修二

教授 道園 真一郎

准教授 方 志高

助教 渡邊 謙

准教授 松本 利広

研究副主幹 森下 卓俊

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
J-PARC センター加速器ディビジョン加速器第一セク
ション

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full Baiting DU

Title Development of Compact Local Power Distribution System for the International Linear Collider

In this research the compact Local Power Distribution System (LPDS) for the International Linear Collider (ILC) is developed and tested in the Super-conducting RF Test Facility (STF) at the KEK.

The 250 GeV ILC accelerates the electron and positron beams to 125 GeV by the Super-conducting (SC) cavities. The RF power generated from a 10 MW multi-beam klystron is transmitted to 39 cavities by the Power Distribution System (PDS). The RF signal has a frequency of 1.3 GHz, a repetition rate of 5 Hz and a pulse width of 2 ms. The total number of RF units and cavities are 236 and approximately 8,000 for the 250 GeV ILC. The distance between adjacent cavities is 1,326 mm thus the phase difference between adjacent cavities is 90° . Each PDS is composed of three LPDSs for 13 cavities. The power fed to the LPDS is divided to three secondary LPDSs for four or five cavities by the variable power divider. The average input power for the LPDS for five cavities is approximately 1.3 MW. This research focused on the development of secondary LPDS. The ILC Technical Design Report (ILC-TDR) indicates the accelerating gradient of SC cavity has the variation of $\pm 20\%$ owing to the cavity performance, yielding variation of input power. The requirement of LPDS is presented in the ILC-TDR: the LPDS is remotely controlled; the adjustment of input power satisfy the variation of accelerating gradient for SC cavity; the LPDS can be integrated on the cryomodule. Also the beams are expected to be accelerated on the crest of RF field to improve the beam energy. The variable hybrid (VHB) and variable phase shifter (VPS) are occupied in the LPDS to adjust the power and phase of SC cavities. The cryomodule integrated with LPDS is installed in tunnel by cart due to the limited space of tunnel. Considering the LPDS presented in the ILC-TDR, the cart cannot be removed after the installation result in the assembled difficulty.

The compact LPDS is developed to solve the assembled difficulty and reduce the production cost. Several candidates with new arrangement of RF components for the compact LPDS are presented. The VPS are moved from bypass of each cavity to the main road of compact LPDS to compensate the phase shift of subsequent VHB. Thus the phase shift of VHB is not accumulated for all the following cavity. This arrangement can reduce the required adjusted phase range and also geometrical length of VPS. The adjustment of input power for SC cavity is estimated for $\pm 25\%$ to satisfy the $\pm 20\%$ variation of accelerating gradient. The corresponding coupling ratio of the VHB should

have the range from -8.84 to -2.04 dB. The compact VHB is designed to satisfy required coupling ratio. Two metallic fins are installed in the VHB and moved symmetrically to adjust the power coupling ratio. The length of compact VHB is decreased from 1,100 mm to 730 mm. The simulated reflection is less than -30.0 dB and the power transmitted to dummy load is less than -29.6 dB. In case of $\pm 25\%$ variation of coupling ratio, the maximal phase shift of the VHB is 17° . Considering some margin, the required phase of the VPS is 35° . The geometrical length of compact VPS is decreased from 600 mm to 300 mm. The simulated phase of the VPS can be adjusted from 35.9° to -1.9° with return loss less than -30.0 dB. The Fixed Phase Shifter (FPS) is designed to adjust the phase difference between adjacent cavities to 90° . The phase of FPS can be shifted from standard waveguide by changing the width of waveguide. Total eight FPSs with narrow width or wide width are designed for the upstream and downstream compact LPDSs. The simulation of compact LPDS satisfy the requirement of power distribution and phase. Total three VHBs, four VPSs and three FPSs are manufactured to constructed and demonstrated the compact LPDS for four cavities in the STF.

Before constructing compact LPDS, the measurement of S parameter and test of power handling capability are necessary for the RF components. The S parameter is measured by the network analyzer. The measured coupling ratio of the VHB satisfy the required range from -8.84 dB to -2.04 dB, and the measured return loss is less than -29 dB while the fin is moved from 1.5 mm to 15.0 mm. The measured phase of VPS is adjusted from 36° to -1° , and return loss is less than -30 dB while the fin is moved from 0.0 mm to 43.0 mm. The measured phase shifted range of VPS is 37° and satisfy the requirement. The phase difference between measurement and simulation for the FPS is less than 1° . This phase difference can also be compensated by the VPS. The measured return loss the three FPSs are all less than -33 dB.

Considering the worst condition of total reflection, some margin of power and system interlock time ($\sim 7 \mu\text{s}$), the target of high power is test is a power of 2.0 MW with a pulse width of 2 ms and a power of 5.2 MW with a pulse width of 200 μs . These two targets are corresponded to the operation with full pulse width and reliability in case of total reflection. In order to test the power handling capability of RF components for the compact LPDS, the L-band resonant ring was constructed and evaluated maximal power in the STF. The VPS are tested when the fin is close to the wall, half and full of moving range. The VHB are with the coupling ratio for average power distributed condition and maximal value. The test result indicate that the designed RF components can be operated with the target power.

Finally the compact LPDS for four cavities are constructed and connected to the cryomodule 'CM-2a' in the STF. The low power test indicates the compact LPDS can not only satisfy the average power distributed condition but also 25% variation of input power for SC cavity. The phase difference between adjacent cavities is held around 90° during the adjustment of power distribution. The feasibility of compact LPDS is initially

demonstrated. The high power test and beam operation will be done in the next year to demonstrate the compact LPDS completely. The operated procedure of compact LPDS is presented to be the preparation for the beam operation.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名

Baiting DU

Title
論文題目

Development of Compact Local Power Distribution System for the International Linear Collider

国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) では、10MW クライストロンで 39 台の超伝導空洞に RF を供給する高周波系を約 240 ユニット用いて電子と陽電子を衝突エネルギー 250GeV まで加速させる。クライストロンから空洞まで RF を供給する高周波電力分配系は、13 台の空洞に対して 4 台、4 台、5 台と線形に接続した局所電力分配系 (Local Power Distribution System, LPDS) の 3 セットの構成となっている。この LPDS は電子・陽電子を効率よく加速するために、①各超伝導空洞を最大電界近くで運転するための電力調整機構、②ビームを最大加速位相で運転するための位相調整機構、③これらを遠隔で制御する機器が必要とされる。ILC の技術設計報告書で示されている LPDS では、可変移相器での移相量が大きく、結果その構造が大きくなり、ひいてはトンネルへの空洞インストール時に問題となることが分かってきた。

出願者である Du 氏は、本論文の中で、まず技術設計報告書での LPDS の構成を見直し適格な固定移相器を随所に挿入配置することで、空洞への電力位相調整量を小さくでき、LPDS 全体としてコンパクトな構成へ変更できる Compact LPDS を新たに提示している。続いてシミュレーションを活用して最適化された可変分配器、可変移相器、固定移相器の具体的な設計をおこない、それに基づいて各機器を製作したことを述べている。さらにそれらがいずれも ILC で要求される性能を満たすことを、構築したレゾナントリングでの大電力試験により示している。一般的に高電力での運転時には、高周波放電などの異常が時折発生するのが普通である。レゾナントリングでの試験では、ILC 仕様に準拠した異常検知システムからのインターロック信号によって大電力高周波を遮断し、大電力運転が問題なくできることを明らかにしている。また、機器の健全性が運転後にも損なわれていないことも確認している。論文の最後に、こうして開発に成功した機器と既存ダミーロード等を組み合わせて 4 空洞向けの LPDS を実際に組立てて、システムが予定通りの性能を有することを低電力測定で確認している。今後、LPDS へ大電力を投入して性能評価をおこなえる段階に至ったと述べたところで論文は終わる。

ここで一例として、可変分配器をとりあげ、すこし細かく説明してみる。分配器とは、入力されたパワーを決められた分岐比で、二つに分けて出力するマイクロ波機器である。分岐比を (運転の状況に応じて、連続的に) 変更できる機能を持つものがここでいう可変分配器である。ILC の LPDS に要求される分配器の分岐比は、それがどこに置かれるかによって -8.8dB ~ -2.0dB (0.13 ~ 0.63) の広い範囲に分布する。氏は、まずその範囲をすべてカバーできる単一の可変分配器が設計可能であることを明らかにした。続いて、実機の製造と高電力試験を行ない、それが ILC で要求される仕様を満たす性能を持つことを確かめたのである。

本審査において、Du氏はこれらの内容について詳しく発表をし、委員との質疑応答を行った。氏はこれまでに数度の国際会議に参加していること、また今回の成果をもとに学術雑誌への論文投稿をおこなったとの報告があった。審査は英語で行われ、質問に対しても的確に答えており英語力にも問題はなかった。Du氏の成果について、博士論文として十分なものであると審査委員全員の意見が一致、本審査合格との結論となった。