

氏 名 水 野 元

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大乙第19号

学位授与の日付 平成8年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 On an RF Power System for the X-Band electron-
positron Linear Colliders

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 平松 成範
教 授 絵面 栄二
教 授 小早川 久
教 授 高田 耕治
教 授 山崎 良成

論文内容の要旨

On the next generation of electron positron linear colliders, it is widely believed that the next electron positron linear collider at the energy range of 500 GeV center of mass will be an ordinary linac type collider driven by the pulsed RF power sources at between S-band and X-band frequency. The most widely studied design of the collider was the 11.424 GHz X-band normal conducting linac versions. These linear colliders are currently planned as to consume 100\200 MW electricity for driving their main linacs. Considering this power consumption, the energy conversion efficiency from wall plug to RF power at the input of the accelerating structures is one of the most important issues for the realization of the 500GeV to 1TeV center of mass linear colliders.

In the linear colliders, the overall energy conversion efficiency from wall plug power to RF input pulse at the input of the accelerating structures is mainly determined by several factors such as, a Klystron, a modulator and an RF pulse compression system. The rest of the conversion stages such as, DC power supply for a modulator, RF power transportation at several stage, and RF power driving system before the accelerating structures have only relatively smaller contribution to the overall efficiency compared with these three main factors. In these factors, klystron is rather independent of its operation pulse width, but the efficiency of other two important stages, firstly a modulator and secondary an RF pulse compression stage, strongly depends on the choice of their operational pulse width. These technologies, especially a short pulse modulator and an RF pulse compression system for the use of short pulse shorter than 1 micro-second, still has the room for further improvements compared with those of currently utilized for driving S-band pulsed RF power source.

In the next generation of linear colliders, the necessary RF power at the input of an X-band accelerating structure is around or even more than 100MW of the peak with the pulse duration of 100-200nsec, which is the sum of the structure's filling time and the period covering the bunch train. Therefore, even with the factor 4 RF pulse compression scheme, an X-band klystron output pulse width should be as short as 400-800ns. It will be very likely that the overall efficiency of the RF pulse compression stage necessarily limits the klystron pulse length up to this range. Unfortunately, this pulse duration of 1-microsecond or shorter is far shorter than that of an ordinary modulators which is widely used to drive the present day S-band klystrons. The contemporary conventional type modulator cannot supply such short pulse efficiently, because of its rather long rise and fall time compared to the necessary pulse duration of 400-800ns mentioned above.

In this paper, a conventional type X-band RF power system of the future

linear collider was studied. To improve the over all RF power conversion efficiency from wall plug power to X-band accelerating structures, two major improvements were introduced to a klystron modulator and an RF pulse compression system respectively.

Regarding the klystron modulator, new Blumlein type PFN with a step up pulse transformer was tested. As presented in chapter 4), this Blumlein type configuration of two PFN's double the primary voltage and can relax the step up ratio of the pulse transformer. As discussed in chapter 4), this Blumlein type modulator could achieve the shorter rise time compared with the ordinary single stage PFN could achieve.

The Blumlein type modulator that can produce twice higher voltage pulse than the ordinary single stage PFN was successfully tested. Loaded with the 100MW class X-band klystron XB72k of $1.2\mu\text{P}$, this Blumlein type modulator with 1-8 pulse transformer achieved the rise time of 300ns (10-90%) at the cathode voltage of 430kV with the pulse duration of $1\mu\text{sec}$ FWHM. The rise time of the ordinary type modulator with the single stage PFN with 1-15 pulse transformer was measured as 600ns.

Although the strict comparison between a single stage PFN and Blumlein type PFN is quite difficult, it could be estimated that as the klystron driver of the X-band RF system for linear colliders, this new Blumlein PFN with pulse transformer could improve the modulator efficiency from 60% to 75%.

Regarding to the RF pulse compression system, a new pulsed RF power distribution system named Delay line Distribution System (DLDS) was proposed. The operational principle and elementary characteristics of this system as a part of the RF power source system of X-band linear collider were studied. This new system was found to be more advantageous than any other existing conventional RF pulse compression systems such as SLED, SLED2, VPM and BPC with respect to system efficiency, operational flexibility, compactness and cost. Design study of DLDS as the power source of 500GeV center of mass X-band linear collider revealed that the system efficiency of the DLDS could reach 90% which is about 20% better than 72% of the ordinary SLED2 RF pulse compression system.

As this new DLDS is based on the new operational principle other than SLED family. In DLDS, a long RF input pulse which is usually as long as 3-4 times longer than the linac driving pulse, is only divided into number of shorter pulses sent to the different parts of the linac and they are never compiled each other again like in the conventional RF pulse compression system such as SLED family or BPC. Because of the RF pulse that is fed into the linac is simply the output pulse from the klystrons, phase and amplitude of the each pulse can be controlled as an ordinary klystron power system.

These two improvements of the X-band RF power system, firstly the application of the Blumlein modulator to the klystron driver, and secondary, introduction of the new RF pulse compression equivalent system of DLDS, were estimated to improve system efficiency about 1.4 times higher than the combination of an ordinary modulator and SLED2 RF pulse compression system.

水野元氏の学位申請論文は、将来の電子／陽電子リニアコライダの加速用高周波源の高電力化及び電力効率改善に関する研究である。リニアコライダはその巨大さの故に極めて大きな電力を消費する。消費電力をいかに低く抑えるかはリニアコライダ実現にとって重大な問題である。水野氏の学位論文は、現在最も有望な方式の一つと考えられているXバンド・リニアコライダの、クライストロン駆動用パルス電力源、及びクライストロン出力を合成してリニアックに供給する方式に関して新しい方式を提案し、これまで提案されている方式に比べて大幅な電力効率の改善が可能であることを示したものである。リニアコライダはピーク・パワー 100～300MW以上、パルス幅約250nsec程度の加速用マイクロ波源を多数必要とする。このような短いパルスを高効率で直接発生することは現在の大電力パルス・クライストロン技術では困難であるため、パルス幅を短くし、ピーク・パワーを増大するパルス圧縮技術が不可欠のものと考えられている。

クライストロンの効率を制限している大きな要素の一つは駆動用高電圧パルスの立ち上がり時間である。パルス圧縮を想定しても、現在広く用いられているパルス成形線路（PFN）と昇圧トランスから成るパルス電力源の立ち上がり時間は不十分であり、15～20%以上の立ち上がり時間に基づく電力損失が存在する。水野氏はパルス昇圧トランスの昇圧比が立ち上がり時間を左右することに着目し、1対のPFNで構成されるブルームライン線路を初めてクライストロン電源に採用して1次側電圧を2倍にし、トランスの昇圧比を通常の1/2に低減することで、これまでの約1/2の立ち上がり時間（約300nsec）を有する430kVのクライストロン駆動用パルス電力を実現することに成功した。同時に回路解析により200nsec以下の立ち上がり時間が可能であることを示し、10～15%以上の効率改善が期待できることを予想しており、クライストロン電源の今後の設計に大きな影響を与えるものと考えられる。

またクライストロン出力を合成して、リニアックの加速管に供給する方式として遅延線分配方式（DLDS）を提案し、高周波電力供給効率をSLED等のエネルギー貯蔵を伴うパルス圧縮方式に比べて20%以上改善できることを示した。DLDS方式ではバイナリーパルス圧縮法（BPC）等と同じように、クライストロンを位相変調し、3dB結合器の位相特性を利用して複数本のクライストロンの合成した出力パルスを時間的に切り分けるが、その後エネルギー貯蔵による時間遅れを利用して切り分けたパルスを再合成してパルス圧縮を行うことなく、直接加速管に供給するものである。切り分けたパルスをリニアックの異なる部分へ供給し、導波管の伝搬時間とビームの走行時間を適当な条件に合わせることで、ビームを2回以上加速するもので、パルス圧縮法と同等の加速エネルギーを得ることができる。DLDS方式ではSLEDのような反射等によるエネルギー損失を伴わないので、本質的に高効率である。マイクロ波電力の形でのパルス圧縮を行わずにパルス圧縮と同等の効果が得られることが特徴であり、画期的な方式と云える。位相誤差等の各種の誤差の影響についても詳細に検討されており、導波管の材質を選択することで解決可能と結論している。なおBPCとの対比においては、基本的な効率には大きな差異はないが、遅延線路による損失はBPCよりはるかに小さくできることが示されている。またDLDS方式は切り分けるパルス数に大きな自由度があることも、他のパルス圧縮方式にはない特徴である。

以上のように、ブルームライン線路を応用したクライストロン駆動電源とDLDSの採用により、これまでのSLED方式を用いた設計例に対して、約40%の電力効率の改善が期待できる。これは100～200MWの平均消費電力を要するリニアコライダにとって、極めて重要な電力問題を大きく前進させるものであり、その独創性ととも高く評価できる。