

## A power supply for XFEL/SPring-8

Sekiguchi Yoshihiro #A)

A) RIKEN Facility & Utility division

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0098

### Abstract

The XFEL institution is under construction now in a SPring8 campus. We installed a machine AC power supply as electric facilities construction. It is to make the voltage regulation of the AC power supply small to be important. I report it about some technology that I adopted to make the voltage regulation of the AC power supply small.

### 理研XFELマシン用交流電源はこうした

#### 1. 目標は電圧±5%

インバータ電源装置の使用電圧範囲は  $420V \pm 5\%$  としたい。AC電源計画をするときに、インバータ電源の設計を担当する研究者から提示があった。つまり使用電圧は  $399V \sim 441V$  ということである。 $\pm 5\%$  とすることにより、インバータ電源のダウンサイズ、コスト削減が可能になるとのことであった。

通常の電機品は使用電圧  $\pm 10\%$  で設計されるのが常である。 $+10\%$  の側は機器の絶縁耐力に影響する。電圧が低いほど絶縁距離をとったり、絶縁材の選定に注意したりしなくてすむ。しかしながら  $420V + 10\% = 460V$  であるから、 $+5\%$  の  $441V$  との差は小さいので絶縁性能に違いはなく、機器仕様の大きな違いにはならないであろう。

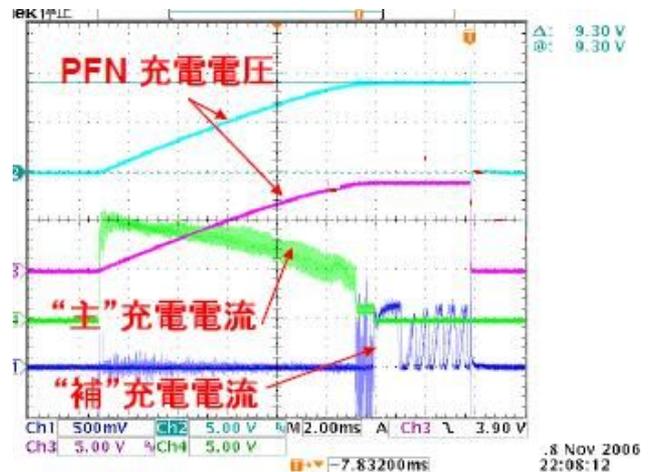
対して電圧のマイナス側は機器設計に大きく効いてくる。電圧が低ければ同一出力を得るためには電流を増やさなければならない。機器内部導体を太くする必要があり、機器発熱は電流の二乗で効いてくるので放熱対策も必要となる。特に放熱は空冷となるため、冷却空気の流路を確保するため機器サイズを大きくしてしまう。電圧  $5\%$  の違いは大きいものとなる。

加えてインバータ電源はモジュレータ電源内のコンデンサに充電するためのものであるから、電圧低下が起こると規定時間内に十分な充電ができなくなる可能性がある。よって、下限電圧を厳守することが交流電源の目標となる。

XFEL電子線形加速器では70台以上のマシンが一斉に同期して作動する。負荷電流=充電電流も一斉に流れる。モジュレータへ  $16msec$  程度の時間で充電し、それを放電まで保持する。つまり負荷電流は定常電流ではなく、間欠的なものとなる。無負荷の状態から一気に負荷電流が流れ、また無負荷になる。当然配電システムのインピーダンスにより、負荷電流が流れる間は電圧降下が発生する。このとき、最低電圧である  $399V$  を保持する必要があるのである。要するに電圧降下を少なくするためには、配電システムのインピーダンスを小さくすればよいのである。

電力工学において、無負荷状態に電圧に対する無負荷状態の電圧と全負荷状態の電圧の差を電圧降下

#sekiguchi@riken.jp



インバータ電源の充電曲線 (加速器電源シボゾウム08 稲垣氏資料)

率と定義しており、電圧変動が小さい範囲であれば以下で計算できる。

$$\varepsilon = p \cos \theta + q \sin \theta$$

$\varepsilon$ : 電圧変動率[%]

$p$ : 配電システムの抵抗[%]

$q$ : 配電システムのリアクタンス[%]

$\cos \theta$ : 力率

$\sin \theta$ : 無効率

60Hz用400V変圧器の標準電圧は440Vであるので、インバータ電源使用電圧の上限441V以下である。これを無負荷電圧と想定し、最低電圧を399Vとすると、電圧変動率は9.3%である。この程度であれば実現可能と判断し、AC電源の設計を行った。

上式に示すとおり、電圧変動率を小さくするには配電システムのインピーダンスを小さくすればよい。XFEL400V系マシンの負荷は約5000kVAである。これ以外の冷凍機やポンプ、ヒーター等の負荷は、メインマシンと同期して運転するわけではなく、定常電流として扱ってよいだろう。メインマシンが消費する5000kVAの間欠的に流れる負荷電流による電圧降下のみ検討すればよいと考えた。以下の技術を組み合わせてることにより、これを実現する。

## 2. OLTC 付特高変圧器

Spring-8 キャンパスは関西電力より 77kV で受電している。今回、既存第3特高変電所に XFEL 専用 12MVA 変圧器(77kV/6.6kV)を1バンク増設した。専用変圧器とすることにより、キャンパス内他施設への影響を少なくできる。XFEL マシンの on/off による電圧降下の影響は他バンクの負荷に影響を与えない。また、XFEL から流出する高調波電流は、特高変圧器自身がフィルターとなって抑制される。

関西電力から供給される商用電源の電圧は、時刻によって、季節によってゆっくりと変動している。需要の大きい昼間や夏季は受電電圧が上昇し、夜間や中間季は需要電力が小さいので電圧は低くなる。今回採用の特高変圧器には OLTC (負荷時タップ切替装置)を設けた。これにより商用電源電圧の日変動、季節変動を調整し、6kV 母線電圧を一定に保つこととした。また XFEL 内での定常電流による電圧降下も OLTC により調整可能とした。これにより昼夜、季節による電圧変動を調整し、400V ラインの無負荷電圧を定格電圧 440V に維持するものとした。

電圧変動を小さくするためには特高変圧器のインピーダンスを小さくしたほうがよい。一般的に変圧器の経済設計のためには、自己容量基準でのインピーダンスは 10%程度がよいとされている。設計によってインピーダンスを小さくすることも可能であるが、コストが高くなる。コストに影響を与えない範囲で、インピーダンスを決定する必要がある。またインピーダンスを小さくすると、6.6kV 母線での短絡事故電流が大きくなり、フィード遮断機の遮断容量も大き

くなる。遮断機の遮断容量もコストに大きく効いてくるので、やみくもにインピーダンスを小さくするわけにはいかない。これらの条件を勘案して、変圧器インピーダンスは 8.5%とした。

400V 系マシンの需要電力 5000kVA の力率は不明であったが、SCSS 試験加速器での計測でほぼ 0.6 と見込んだ。この値での無効電力は 4000kvar であるので、特高変圧器での電圧変動率は約 2.8%となる。

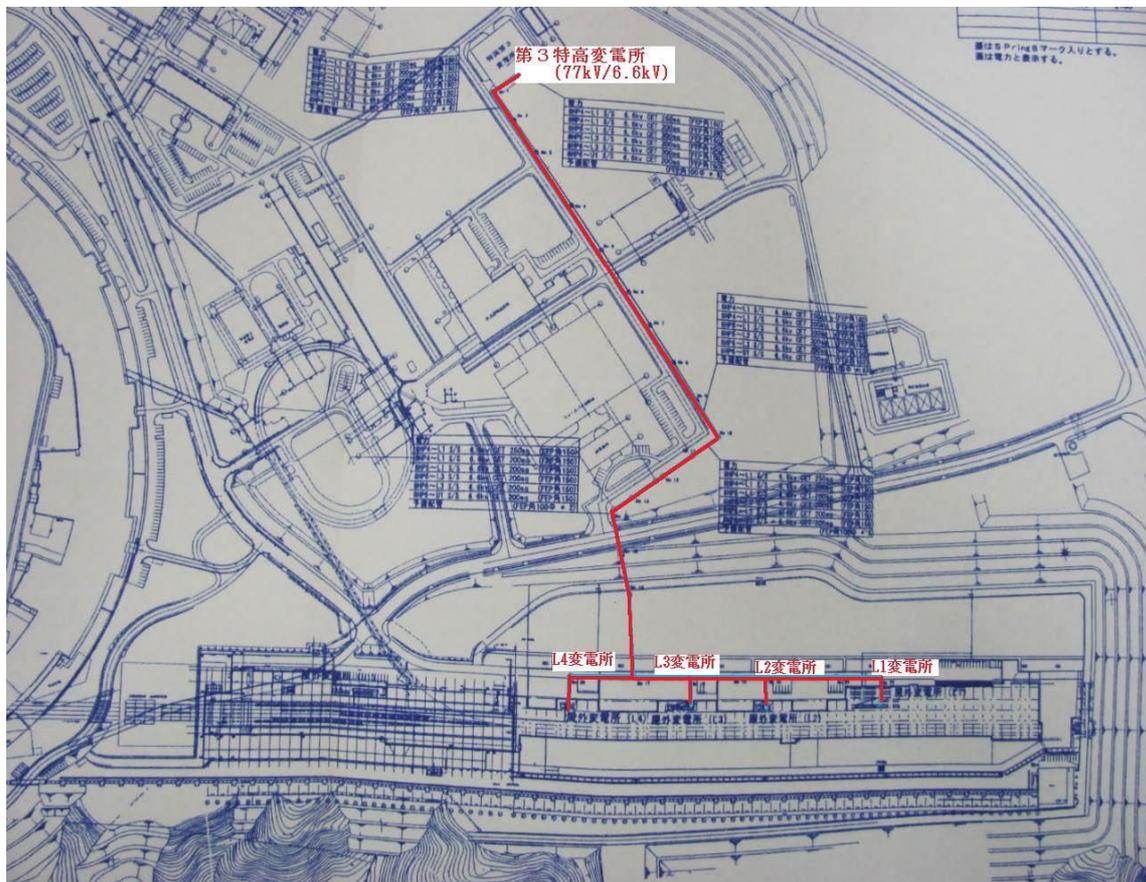
## 3. 二次変電所の分散配置

XFEL 線形加速器の長さは 400m にもなる。400m の区間にほぼ均等にマシンは並べられるのである。これらに AC 電源を供給する二次変電所は分散配置せざるを得ない。低圧配電距離を 50m とすると理想的には 4ヶ所、100m 間隔で設置するのがよい。実際には負荷密度にも考慮し、下図の配置とした。

構内の 6kV ケーブルルートも 4つの二次変電所までの距離に大きな差がないようにし、メインマシン系ケーブルは CET200sq、最長 900 mとした。コストとの兼ね合いで、400V 実験系は 2系統でほぼ 2500kVA ずつ配電している。900m の CET200sq ケーブルのインピーダンスは 3.5% (10MVA 基準)であるから、ここでの電圧降下は 0.9%ほどとなる。

## 4. 大容量高/低圧変圧器の採用

4つの二次変電所に分散配置した負荷は、それぞれの 6.6kV/440V 変圧器から給電される。負荷のアンバランスを変圧器部分で吸収し、低圧配電系統の電圧降下を等しくするため、大容量変圧器を選定し

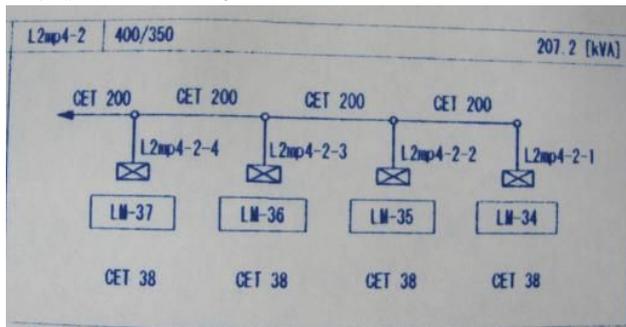


た。当然ながらインバータ電源専用変圧器とし、高調波抑制フィルタとしての効果も期待する。標準品の1000kVA変圧器のインピーダンスは5%であるので、通過電力から計算される電圧降下は3.3%となる。

なお、440V母線には電圧計と遠隔監視が可能なトランスデューサーを設置してあり、その情報はマシン制御系と同一LAN(FL-net)に載せてある。何らかのトラブルがあった場合、その原因がAC電源系にあるかどうか、マシン運転とリンクさせて解析が可能となっているXFELのように精密な制御が必要な加速器施設において、AC電源などユーティリティ施設ももはや「マシンの一部」と言ってよい。交流電源設備だけでなく、熱源設備、空調設備、マシン冷却設備の情報もFL-netに乗せてあり、マシンと一体的な監視ができるのも本施設の特徴の一つである。

### 5. 低圧配電距離は50m

二次変電所を分散配置したことにより、マシン400V系の低圧配電距離は50m程度とすることができた。ほぼどの系統も1幹線に4面の実験用分電盤が接続されている。



幹線容量は現計画での需要電力の1.2倍とした。それはSCSS試験加速器においても2割増運転の実証試験を行っており、本施設でも将来増強運転の可能性があるのである。また、予定外の負荷を増設する場合でも、2割の余裕内であれば新たに配線することなく、幹線分岐により電力を引き出すことができる。そのために、幹線末端まで同一サイズのケーブルとし、中間でのサイズダウンは行わない。当然ながら、変圧器の容量も2割増としている。

2割増で計算した幹線サイズはCET200sqとなった。50mのCET200sqケーブルのインピーダンスは41%(10MVA基準)であるから、通過電力から計算される電圧降下は0.85%である。

以上から、力率にも影響されるが、特高変電所から負荷端までの電圧変動率は8%程度と概算される。よって目標である電圧変動率9.3%以内に納めることは可能であると考えられる。

### 6. マシン直近に実験分電盤を配置

クライストロンギャラリ内には約100面の実験用分電盤が設置される。制御ラックやモジュールータ電源1ユニットごとに、分電盤1面をマシン直近に設置した。分電盤から各負荷への分岐配線が短くなり、

電圧変動率を小さくすることができる。分電盤が直近にあるので、分岐配線にかかる時間とコストも節約が可能である。



これらの各分電盤の必要回路数はほぼ同じであった。多少の回路数、ブレーカー容量の違いはあったが、最も回路数の多い分電盤と同一サイズで、すべての箱体を製作した。各盤ごとに必要なブレーカは実装し、空いた部分は予備スペースとした。各盤への分岐幹線サイズも同サイズとすることにより、予定されていた個別負荷に変更があった場合も、盤内ブレーカの交換、追加のみでほぼ対応可能となる。箱体をすべて同一サイズとすることによって、冷却水配管など他設備との取り合いも統一され、高密度に機器類が設置される空間を有効に活用できる。

各分電盤にはAC3Φ420V、AC3Φ210V、AC1Φ210/105V、GC1Φ100Vの4種類の電源が収納され、多様な要求に応えることができる。各電源種別ごとにSPD(サージプロテクションデバイス;過電圧保護装置)が取り付けられ、誘導雷による過電圧から負荷設備を保護している。

番号	名称	種別	電圧	容量	分岐数	備考	設置場所	備考
1	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
2	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
3	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
4	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
5	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
6	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
7	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
8	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
9	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
10	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
11	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
12	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
13	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
14	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
15	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
16	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
17	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
18	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
19	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
20	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
21	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
22	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
23	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
24	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
25	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
26	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
27	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
28	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
29	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
30	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック
31	実験電力 (100kVA)	電源	E	2	50	20	バックインバータ電源	バック

8月現在においてほぼマシン類の設置は完了し、10月頃から電源投入、試運転開始予定である。来年3月までにはすべてのインバータ電源が作動し、8GeV電子ビームを発生する。来年の学会では、実際のインバータ電源負荷端での電圧変動を測定し、報告したい。