

J-PARC陽子リニアック設備の高調波対策

千代 悦司¹、山崎 正義、堀 利彦、長谷川和男
日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

概要

J-PARC、Linacの受電系統には、電磁石電源や高周波電源等の半導体を使用した機器から多量の高調波電流が流出する。主要電源の整流方式や回路構成から高調波抑制ガイドラインに則って電流を算出するとともに、実測を行い各電源からの高調波電流を算出した。結果、6.6kV系統換算で91Aの高調波が発生し、そのうち半分以上がクライストロン高圧直流電源からであった。高調波対策は、主に第2変電所の6.6kV系統に接続された大容量の高調波フィルタにより行なわれる。その容量は、1Mvarから数百kvarであり、進相コンデンサと協調して電源系統の安定・効率的運転を行なう計画である。

1. はじめに

日本原子力研究所、東海研究所に建設される大強度陽子加速器施設(J-PARC)の加速器は、400MeVリニアック(Linac)、3 GeVラピッドサイクルシンクロトロン(RCS)、50GeV主シンクロトロン(MR)から構成される。これらの加速器群の電気設備容量は、Linacで34MVA、RSCで38MVA、MRで55MVA(運転当初は25MVA程度)であり^[1]、膨大な設備容量となる。これら需要電力の大部分を占めるのが、電磁石電源や高周波電源等のAC-DCコンバータを有する機器であり、これらの機器は大容量で多数の半導体素子で構成され、運転時には多量の高調波電流を発生する。

近年、半導体素子の急速な発展により、半導体素子を用いた機器が急速に普及している。これら機器から発生する高調波電流により、調相設備等の受電設備が焼損し、また、制御機器等が誤動作する障害が顕在化している。このため、電力会社が要求する受電点(分界点)での電圧歪みの指定値(許容値)も厳しく指定されており、高調波抑制ガイドライン^[2]では、特別高圧受電点での電圧総合歪み率を3%以下と規定されている。本施設を含む原研東海研究所と東京電力との分界点では、各次電圧歪み率0.5%以下、総合電圧歪み率1%以下が指定されている。

本稿では、Linacで用いられる主要機器の高調波発生量を積上げ、現時点で検討されている高調波対策について記述する。

2. LINAC高調波発生量

2.1 高調波発生電源

Linacは、RFQ、DTL(3空洞)、SDTL(42空洞21ユニット)及びACS(62空洞31ユニット)の加速空洞により構成され、イオン源で生成されたHビームを400MeVまで加速する。RFQからSDTLの終段までに20台の324MHzクライストロン(定格出力:3MW、620 μ s、50pps)が使用され、ACS及びビーム輸送系には25台の972MHzクライストロン(定格出力:3MW、620 μ s、50pps)が使用される。表1は、Linacで高調波を発生しうる主要電源の台数、合計容量及び電源の整流方式を示す。高調波を発生する電源として、1)イオン源(Ion)電源、2)ビーム輸送系に用いられるソレノイド電磁石(S-mag)電源、Q電磁石(Q-mag)電源、偏向電磁石(B-mag)電源、3)クライストロン高圧直流電源(KLY-HVDC)、4)クライストロン集束磁場コイル用(KLY-mag)電源、5)冷却水設備の温調用ヒータ(Heater)電源が挙げられる。その他にユーティリティ設備や小容量の半導体増幅器・直流電源及び制御機器からも高調波が発生するが電流量として比較的少量であるのでここでは省略する。

Ion源電源は、ビーム引出しの為の高圧電源、アーク電源及びフィラメント電源等から構成され、整流方式は、三相全波整流+コンデンサ平滑であり、フィルタとして直流側にインダクタ(DCL)が設置されている(図1上段参照、表中記号A)。

ビーム輸送系に用いられる磁石用電源は、小容量のステアリング用電磁石電源を除く殆ど全てが三相全波整流+コンデンサ平滑方式で交流側(ACL)及び直流側(DCL)にインダクタが設置された電源である(図1上段参照、表中記号B)。DTQのQ-mag電源を除くこれらの電磁石電源は連続出力で運転される。DTL用のQ-mag電源はDTQ電源室に最大131台設置され、これらはピーク電流1000A(最大)、50Hzでパルス運転される。これらの電磁石電源は、1台の電源で1台ないし2台の電磁石を駆動するため、電源台数が多く、また、その出力は十数kWから数kWと小さい。

クライストロン高電圧直流電源^[3]は、1電源あたりの電気容量が800kVA程度であり、Linac設備の電源の中で最も大きな単機容量を有する。図1の下段に示すように本電源は、初段に移相変圧器(1次側:、2次側:Y-)をもち、30度位相のずれた3相2線路を整流することにより12パルス換算の全波整流を行なっている。また、平滑コンデンサ及びDCLにより直流側のリップルを低減している(表中記号C)。本クライストロン電源は、324MHzクライストロン用に5台、972MHzクライストロン用に9台設置されるが、半数の電源において移相変圧器の一次側の結線を一部を千鳥結線し、位相を15度ずらすことにより6.6kV系統から見て等価的に24パルス全波整流を図っており、高

¹ E-mail: chishiro@linac.tokai.jaeri.go.jp

表1 Linacの高調波発生機器と発生電流

電源名称	用途 場所	台 数	合計容量 (kVA)	電源 方式	高調波電流 (A) (%)	算出 記号
1 Ion	ION	2	90	A	2.3 3	G
2 S-mag Q-mag	LEBT	2	60	B	1.1 1	G
	MEBT1	12	36	B	0.9 1	G
	DTL	131	1,133	B	2.8 3	A
	SDTL	36	112	B	2.8 3	A
	MEBT2	6	36	B	0.8 1	G
	ACS	42	252	B	5.5 6	G
B-mag	L3BT	72	172	B	3.7 4	G
	L3BT	6	210	B	4.5 5	G
3 KLY HVDC	324-KLY	5	4,400	C	23.9 26	G
	972-KLY	9	5,200	C	28.5 31	G
4 KLY-mag	324-KLY	20	240	B	4.8 5	G
	972-KLY	25	300	B	6.0 7	G
5 Heater	Cooling Sys.	3	1,050		3.3 4	A
Sum			13,291		90.9	

調波電流の発生を抑制している。

クライストロン集束コイル用主電源は、クライストロン1台当り1電源必要であり、整流方式は三相全波整流のACL+DCL付のBタイプの電源である。

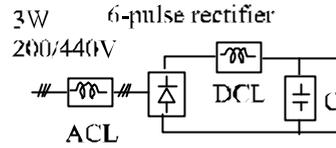
2.2 高調波発生量

Linacの加速エネルギー400MeV、ビーム電流50mA、繰返し数50ppsで動作したときに推測される各機器からの高調波電流を表1にまとめる。表中の高調波電流は、5次、7次、11次、13次、17次、19次、23次、25次の高調波電流の実効値であり、6.6kV系統に流れ込む電流値に換算したものである。算出記号“G”の付いた機器の電流量は、まず、全電源の直流出力や効率等のパラメータから交流入力電流を想定し、表2に示す高調波対策ガイドラインに指示されている回路種別に電源の種類を割り当て、入力電流と表中の次数別発生量から次数ごとの電流量を算出した。記号“A”は、電源の高調波を実測し、その特性から稼働率を想定して算出した。ただし、DTL・Q-mag電源の高調波電流は、低圧側で高調波抑制対策を施した後の6.6kV系統への流出量である^[4]。Linacから流出する高調波電流は91Aであり、半数をクライストロン高圧電源が占める。また、集束コイル電源を含む電磁石用直流電源において、電気容量は全体で2,550kVAであり、表中

表2 電流算出に用いたガイドライン指示値

回路種別	入力電流に対する次数別高調波発生量 (%)							
	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th	23 rd	25 th
A:三相全波(DCL)	30	13	8.4	5.0	4.7	3.2	3.0	2.2
B:三相全波(ACL+DCL)	28	9.1	7.2	4.1	3.2	2.4	1.6	1.4
C:三相全波(12パルス)	2.0	1.5	4.5	3.0	0.2	0.15	0.75	0.75

[A or B Type]



[C Type]

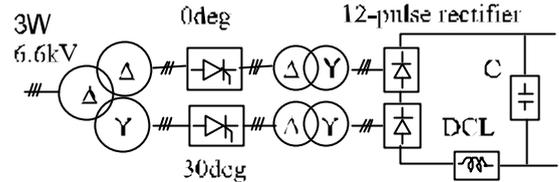


図1 直流電源の各回路構成

機器の約20%程度であるが、高調波の発生量は36%を占める。これらの電源では、単機容量は少量であるが、全機器(合計350台)が同時に動作すると相当量の高調波を発生する。

表中のガイドラインからの算出値は、機器の入力電流に比例して高調波電流が発生するものとして計上している。しかしながら、実際の電源では、出力を低減するとダイオードやサイリスタに流れる電流波形が大きく歪み、多量の高調波が発生する恐れがある。そこで、クライストロン高圧電源を用いて、低出力運転時での高調波電流実測値とガイドライン算出値とを比較した。その結果、定格出力の60%程度で電源を動作させると、ガイドライン算出値より3割程度大きな高調波電流が観測された。現状では、この差異を考慮せず高調波対策の検討を進めているが、最終的には検討値以上の高調波が発生したときの影響を検証する必要がある。

3 . 高調波対策

J-PARC電気設備での高調波対策は、コスト・制御等の観点から主に特高変電所に設置する受動型の高調波フィルタ(FL)により行なう。図2は、受電系統の概略図を示す。J-PARC受電用に3箇所、66kV/6.6kV変電所が新設され、各変圧器の2次側(6.6kV系統)にそれぞれFLが設置される。Linacの電源は、第2変電所に設置された三相3巻線変圧器の片側の変圧器から供給され、同じく3NBT(RCSから中性子実験施設に至るまでのビーム輸送系)の機器もこの変圧器に接続される。3巻変圧器の他方は、RCSに接続される。従ってFLは、この変電所に2式設置される。

図3は、ガイドラインに則り算出された各施設ごとの定格ビーム出力運転時に発生する高調波電流(6.6kV換算)を次数別に示す^[5]。RCS及び3NBTの施設もLinacと同レベルの高調波電流を発生する。各FLの容量は、受電点(図中A点)および66kV母線系統で電圧歪み率が指定値(総合歪み率1.0%以下、各次数歪み率0.5%以下)を満足するように設定され、現在、全系統の均衡を考慮し検討を行なっている。

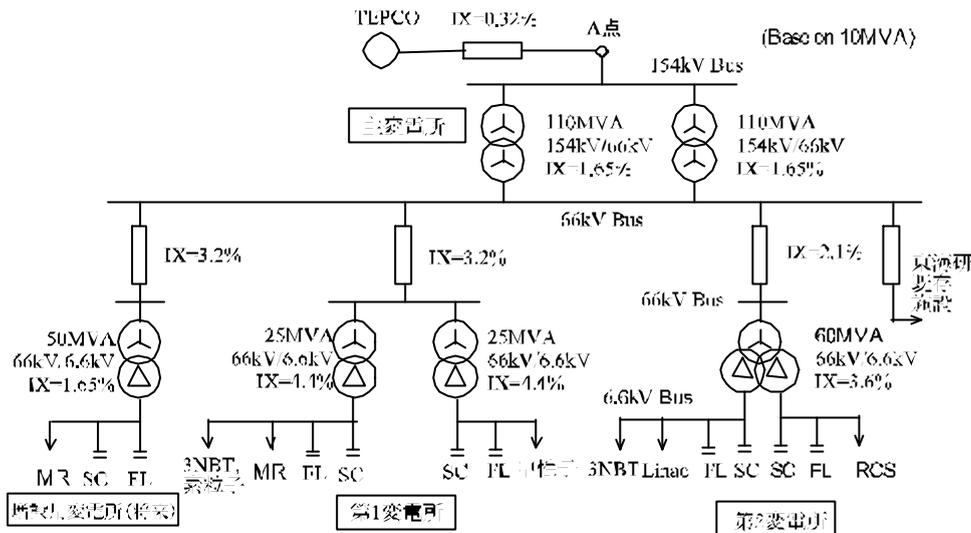


図2 J-PARC受電設備単結線図

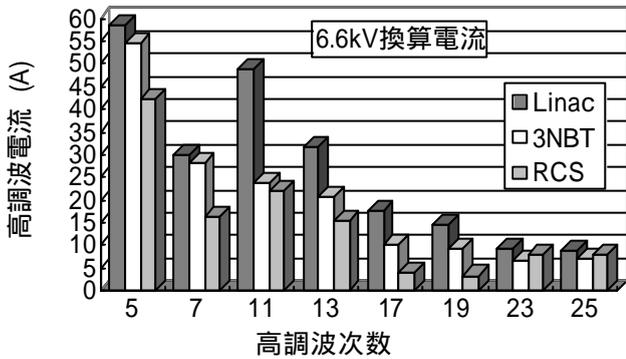


図3 第2変電所での高調波発生電流量

第2変電所における高調波発生量は、加速器の運転状況に応じて増減し、それに合わせてFLや進相コンデンサ(SC)の投入容量を決定しなければならない。高調波発生量の観点から見た加速器の運転モードとして、a)全停止(夏期メンテナンス等)、b)冷却水・空調等のユーティリティ施設のみ運転、c-1)MR+中性子施設へのビーム供給運転、c-2) MRのみへのビーム供給運転、d)ビーム調整運転(コミショニング)の4つモードが考えられる。項目(a)から(c)の運転モードでは、発生電流量はビーム電流に殆ど依存せずモードが決定すると一意的に電流量が決定する。これは、ビーム電流量に比例して変化する機器の消費電力が、全電力に対し数%程度であるためである。ビーム調整運転時には、発生電流は稼働する機器台数に応じて増減するため(b)から(c)までの範囲で変化する。

高調波フィルタと進相コンデンサのON/OFF制御は、変圧器のタップ切り換えを含め、システムを安定にかつ効率運転を行なうために総合的に制御しなければならないが、基本的な方針として、運転モード(b)では、自動制御型SCにより力率を調整し、FLは投入しない。運転モード(c)・(d)では、運転開始前にある一定容量のFLを投入し、基本波に対して、FLが進相コンデンサとして働くようにし、位相補償しきれない分をSC

により自動調相する。よって、負荷容量に応じてFLを入り切りする自動運転は行なわないことを考えている。

最後に、FLの容量は施設全体を考慮して決定しなければならないが、設備規模を見積もるために容量の概算を行なると、Linac・3NBT側分路では、5次：1.3Mvar、7次：660kVar、11次：830kVar、13次以上の高次：1.5Mvarとなり、RCS側分路では、5次：500kvar、7次：200kVar、11次：250kVar、高次：500kVarである。単機容量1MvarのFLの大きさ

は、おおよそ設置面積 2 x 2m、高さ2m程度なので、フィルタヤードとして約150m²の面積が第2変電所に必要となる。

4. まとめ

Linacから発生する高調波電流をガイドライン及び実測値からの推算により電源ごとに算出した。Linacから第2変電所に流出する高調波電流の実効値は91Aであり、このうち半分以上がクライストロン高圧直流電源である。J-PARC施設の高調波対策は、6.6kV母線系統に設置された受動型の高調波フィルタにより行なう。その制御方式は、運転モードの負荷容量に応じて手動(または半自動)でフィルタを投入し、自動制御型の進相コンデンサにより調相することを計画している。今後、施設全体を含めた詳細な解析を行いフィルタの容量を決定するとともに、突然の負荷喪失時に発生するフェランチ現象の対応策やSCとFL及び変圧器タップの協調動作を検討し、システムの安定性・経済性を考慮した運転方式を策定する。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, "Accelerator Technical Design Report for High-intensity Proton Accelerator Facility Project, JPARC", JAERI-Tech2003-044, p603 (2003).
- [2] 電気技術調査委員会 編, "高調波抑制対策指針 (JEAG9702)", (1995).
- [3] 川村 他, "JAERI-KEK統合計画リニアック用クライストロン電源システムの開発", Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting on Japan, p204-206, (2001).
- [4] 堀 他, "大強度陽子加速器リニアック用DTQ電源の高調波対策", 本研究会
- [5] 渡辺, 他, "J-PARC電力設備連絡協議会資料", Private Communication, (2003).