

大強度陽子加速器リニアック用DTQ電源の高調波対策

堀利彦¹⁾、伊藤崇、山崎正義、千代悦司、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

DTQ電源の高調波電流抑制対策としてラインチョーク＋同調フィルタ方式の設計を行ない、試作機でその低減効果を実測したところ第11次調波以上の全ての高次調波で良好な結果を得たが、第5,7次調波に関しては高調波電流が逆に増大するデータとなった。次にこの原因を調査するため、高調波フィルタの回路解析を行った結果、ラインチョークと同調フィルタ間で並列共振が生じており、特に第7次調波ではこの共振電流値と増加電流値とが一致していることがわかった。そこで、並列共振周波数を偶数時の300Hz近傍に‘シフト’するパラメータを計算で求め、実機フィルタ評価機でこの低減効果を実測したところ、第5,7次調波電流は各々14%,18%程度低減することを実証した。

1. はじめに

総数131台のDTQ電源を実機で運用する当り、電源から設備側に流出する高調波電流を電気設備技術指針上限値（ガトリン値）以下に抑制する高調波対策を継続的に検討している。ガトリン値での高調波電流対象次数は第5,7,11,13,17,19,23,25次であり、それ以上の次数については第25次電流に換算するよう明記されている。

第5,7次調波対策については、これを電源単体で対応するためには大がかりな改造を伴うため、等価12バルブ方式を採用する¹⁾。これは位相が30度異なった多層化トランスをDTQ電源上流側（実機では6.6kV/440Vトランス）に設置し、これの運用値容量バランスをとることで高調波電流を相殺する方式で5,7次と同相となる第17,19次調波も同時に低減される。次にSPICEのシミュレーション結果より、第23,25次調波についてはラインチョークが有効であることが判明したため、残る第11,13次調波の低減が懸案となった。そこで、ある特定の高調波成分を低減するためには、ハツプフィルタが簡便・有用と言われており、更にQ値が比較的高くとり易いことから同調フィルタの採用を決定した。

2. 高調波フィルタ定数の検討

2-1. ラインチョーク

3相AC供給ラインとDTQ電源入力に直列に挿入されるインダクタ(Lc)で、フィルタ側から上流側を見込んだインピーダンス： ωLc を大きくとる必要がある。しかし、この値を大きくすると電源入力電圧のドロップに直結する

ためインダクタンス値には制約があり、最大電圧ドロップを5%程度まで許容した3.2mHと決定した。

2-2. 同調フィルタ

R-L-Cの直列回路から構成され、3相AC供給ラインと電源入力に並列に挿入されるハツプフィルタである。DTQ電源は等価的に定電流源とみなすことができ、該当周波数で最もインピーダンスが低下する回路、すなわち、直列共振回路でシャントすれば効率的に高調波を低減することが可能である。具体的にはL-C定数で決定される直列共振周波数:fs を対象次数の11,13次である550Hzもしくは650Hzに一致させるが、今回の設計では11,13次の2つの高調波を同時に低減することを狙いfs=600Hzと決定した。次に、フィルタ定数を決定するための条件としては

- ・ガトリン値以下に第11,13調波を低減するためには、フィルタ有無による低減率を1/6以上とすること
- ・商用周波数：50Hz時のインピーダンス値は無効電力に相当するため、この値を2kVar程度とすること。

である。図1には最終的に得られた回路定数：R=1Ω,L=2.3mH,C=30μF時の次数別高調波電流（周波数で表記）のシャントインピーダンス値とフィルタ有無による低減率の計算結果を示す。第11調波で1/6、第13調波で1/7.5程度の低減効果が見込め、第23,25調波でも約1/2程度高調波電流が削減出来ると期待された。

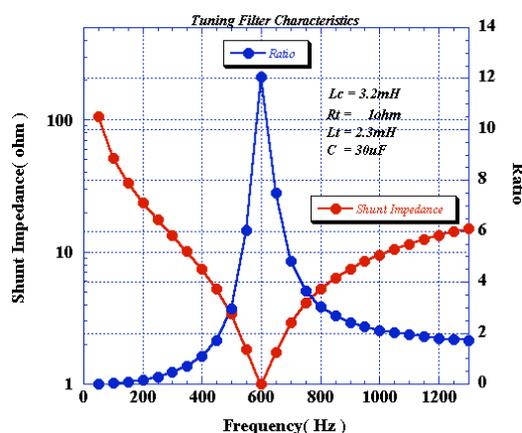


図1. 同調フィルタの次数別特性曲線

3. 試作機での高調波抑制試験

上記の低減効果を評価するため、実機モデルの高調波フィルタ試作機を製作し、DTQ電源代表機で次数別の高調波抑制効果を測定した。なお予算の都合上、等

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

価12°ル方式をも含めた試験環境は準備出来なかったため、計測結果と図1との整合性を評価することに重点を置いた。

試験の結果得られた次数別高調波電流値とガイドライン値との比較を図1に示すが、以下の事柄が明らかになった。

- 1)第11,13次調波並びに第23,25次調波をも含む11次以上の全ての高次調波でガイドライン値を下回る計算値以上の低減効果があった。
- 2)第5,7次調波については計算値と異なり、フィルタ有無により約1.8倍も高調波電流が増大した。

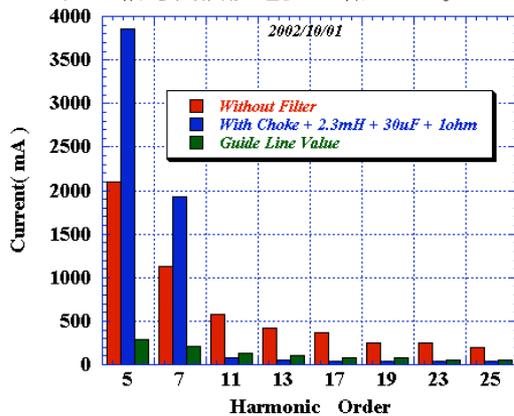


図2. 試作機フィルタでの次数別高調波電流値とガイドライン値との比較

1)に関しては非常に良好な結果であった。しかし、今回製作する高調波フィルタはDTQ電源と同数の131台と多いため、2)の高調波電流増大の問題は改善する必要があり、以下にその原因究明を行なった。

4. 高調波フィルタの回路解析

高調波フィルタの回路インピーダンス： Z とインピーダンス角： Ia は以下の式で記述される。

$$Z = Re + j Im$$

$$Re = (AD + BE) / (D^2 + E^2)$$

$$Im = (BD - AE) / (D^2 + E^2)$$

$$A = RtRc - (\omega Lt - 1/\omega C) \omega Lc$$

$$B = Rt \omega Lt + (\omega Lt - 1/\omega C) Rc$$

$$D = Rt + Rc$$

$$E = \omega(Lt + Lc) - 1/\omega C$$

$$Ia = \tan^{-1}(Im/Re)$$

ただし、

- ω : 高調波電流の角周波数 $2\pi f$
- Rt : 同調フィルタ用の保護抵抗値 1Ω
- Rc : AC商用ラインの等価抵抗値 1Ω
- Lt : 同調フィルタコイルのインダクタンス値 $2.3mH$
- Lc : ラインチョークのインダクタンス値 $3.2mH$
- C : 同調フィルタコンデンサのキャパシタンス値 $30\mu F$

ここで、高調波電流の周波数: f を50Hz(基本波)から1250Hz(第25調波)まで変え、回路インピーダンス vs インピーダンス角を計算によって求めた結果とテストベンチでの実測値を図3に示す。テストベンチでの実測は計算コ

の妥当性を確認するために行なったもので、パルスジェネレータから模擬パルス(10V P-P)を出力し、高調波フィルタ単体で計測を行なった。図3より共振状態を表すインピーダンス角:0の点は

- 1) 回路インピーダンスが最小値の直列共振点
- 2) 回路インピーダンスが最大値の並列共振点

の2点あり、同調フィルタ定数で決定される直列共振周波数(fs :600Hz)に加えて、ラインチョークのインダクタンス値と同調フィルタ定数で決定される並列共振周波数: fp (fs より必ず低い周波数)が存在し、その周波数は

$$fp = 1 / 2\pi \sqrt{(Lt + Lc)C}$$

で決定されることがわかった。

次に、各周波数でどの程度高調波電流が増加減するのかを利得表示で示したものが図4で、テストベンチでの実測値と計算コードでの計算値を示す。図中縦軸の+(プラス)ゲインは高調波フィルタが付加されることによって電流が増加することを表しており、逆に-(マイナス)ゲインでは低減されることを示している。図から試作機フィルタの並列共振点は7次調波周波数:350Hzの近傍であったこと、350Hz時の利得:+4.5dBは図2での増加電流値(1.8A)と良く合致していること、などが判明した。しかし、第5次調波についてはゲイン特性での数値:+2.6dBと図2データ(1.8A)とは大きく異なっている。この原因については、電源内部入力側コンデンサ(コモンモードノイズ除去用と転流サージ抑制用)とラインチョークとの間で共振電流が生じているためと

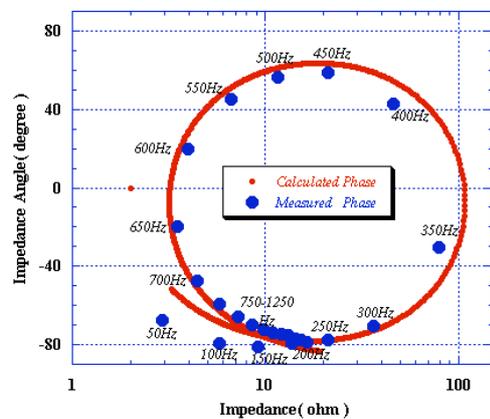


図3. 高調波フィルタ単体でのインピーダンス vs インピーダンス角の実測値と計算結果

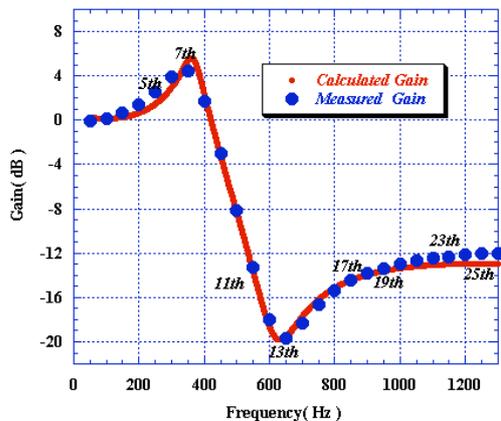


図4. 高調波フィルタのゲイン特性

考えており、DTQ電源内部の回路定数をも考慮した解析が必要である。

以上の結果より、第5,7次調波の電流増大原因は理解できたが、試作機製作時には並列共振点の考察が不十分だったため、偶然にも第7波調波周波数：350Hzと並列共振周波数は近接していた。しかしながら、

- ・第11次以上の高次調波電流がガイドライン値以下
- ・DTQ電源ライン電圧の電圧降下が5%程度
- ・無効電力が2kVar程度

などの制約値を満足した上で、並列共振周波数を偶数次の、例えば、第4,6,8次周波数：200,300,400Hz近傍に「シフト」することが出来れば、5,7次調波の増加電流値は大幅に改善できると考えられる。

以上の考え方に基づいて $f_p=300\text{Hz}$, $f_s=500\text{Hz}$ のフィルタパラメータを計算し、この定数での高調波低減効果を実機高調波フィルタの評価機で検証することとした。

5. 実機高調波フィルタの製作

実機高調波フィルタは評価機を含め今年度に45台、来年度に50台製作される予定で、評価機での実測データを基に最終的なフィルタ定数を決定する。今回納入された実機評価用高調波フィルタは上記の素子定数以外全て実機フィルタと同等の仕様を満足しているものであるが、その内部実装図を図6に示す。高調波フィルタは隣り合うDTQ電源間に固定されるため横幅寸法が250mm以下との制約を受けており、これを考慮した結果、フィルタ寸法を230mm(W)×500mm(D)×250mm(H)に決定した。なお、この寸法を設計するに当たり、電気容量10kVAクラスのフィルタでは可能な限り小型化を目指した。

インダクタとコンデンサには電気工作物の規定から、サーモスタット型温度センサーが取り付けられており、素子温度が90°C以上で温度異常インターロックを出力し、フィルタ前面パネルにLED表示すると共に、この信号で電源出力を停止する。



図6. 高調波フィルタの内部実装図

6. 評価機での高調波抑制試験

フィルタ定数： $L_c=3.5\text{mH}$, $L_t=3\text{mH}$, $C=30\mu\text{F}$ 、並列共振周波数： $f_p=298\text{Hz}$ 、直列共振周波数： $f_s=483\text{Hz}$ （実測値）のパラメータでDTQ電源に評価機用高調波フィルタを付加した時に得られた次数別の高調波電流値（青色表示）を図7に示す。試作機で得られたデータと比較すると

- 1)第11次調波以上の高次調波電流は増大したが、ガイドライン値以下の値であることを確認した。
- 2)第5,7次調波については各々14%、18%程度電流値が低減された。

などを実証した。しかし、今回は回路素子定数を±5%以下の精度で製作したにもかかわらず、共振周波数が計算で求めた数値と5%程度シフトすること、実測値が計算コードでのゲイン特性と若干異なること、など今後も試験や検討を継続して行なう予定である。

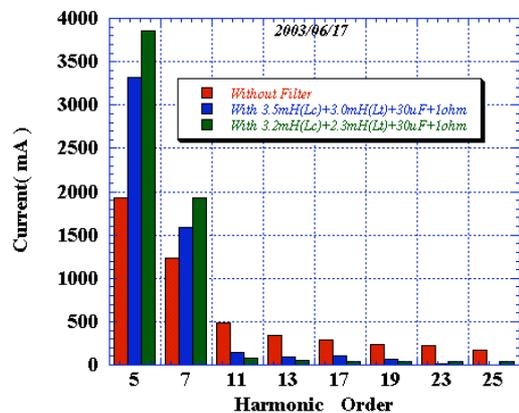


図7. 試作機/評価機フィルタの次数別高調波電流値

7. まとめ

昨年度を含め2年間にわたりDTQ電源の高調波電流対策の報告を行った。第5,7次調波電流に関しては等価12パルス方式を、第11次調波以上の高次調波電流に関してはラインチョーク+同調フィルタ方式での高調波対策を提案し、今回の実測で第11次調波以上の高次電流についてはガイドライン値以下に抑制可能なことを実証した。なお等価12パルス方式については、リアクティブ電源室1に750kVA容量の三巻き変圧器1台が設置されることが決定した。

今後は実機での運用値電力容量バランスを考慮した送電系統の検討を行ない、全数のDTQ電源が定格運

転された時の高調波流出量が設計値どおりがドライブ値以下に抑制されていることを実証する予定である。

8. 謝辞

高調波フィルタ定数の検討並びに製作に関してご協力頂いた東芝電波特機株式会社の箧部亮二氏、寺村弘氏、山崎立己氏の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] T.Hori, et al.,” 大強度陽子加速器リアック用DTQ電源の高調波抑制”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002.pp255-257