

氏 名 張 鳳 清

学位（専攻分野） 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第287号

学位授与の日付 平成9年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 Study on Power Supply for 50Hz Cycling
Synchrotron

論文審査委員 主 査 教 授 新富 孝和
教 授 絵面 栄二
教 授 平松 成範
教 授 遠藤 有聲
教 授 中山 久義
講 師 天沼 克之（千葉大学）

論文内容の要旨

For excitation of synchrotrons, two different ways have been realized to meet magnetic-field cycles, one is the DC ramping, the other is the resonant excitation, also known as the White Circuit. The White Circuit, which is commonly employed in fast cycling synchrotrons, is designed for a distributed resonant configuration to meet two important requirements: (1) the need to avoid drawing a large reactive power from the magnet AC excitation source and (2) a uniform field intensity in all magnets. In the resonant magnet circuit only the losses of the circuit system need to be compensated so that the magnet reactive-power loading can be reduced drastically from the AC excitation source. There is a great variety of power sources for supplying the compensation power to the resonant network, among which the pulsed method has been the main pattern of the AC power sources because of its advantage in the operational flexibility and reliable performance.

A review for the existing AC power sources shows that in the past major efforts in developing various types of AC power source were on the fulfillment of the following three needs, namely: (i) free of higher harmonics, (ii) low reaction to the supply network and (iii) simplicity of the circuit. It is also noted that source voltage variations, particularly the source harmonics, have influences on the resonant output, but this effect was not studied in the past.

Generally, the resonant magnet current is not easily affected by the source voltage disturbances owing to a large stored energy in the resonant network, but it is never immune from the disturbances. In a 50 Hz rapid cycling power supply, a modulation was observed in the resonant AC current of the synchrotron magnet. The undesirable modulation was found to be caused by the subharmonics of the source voltage provided by a 12-pulse SCR rectifier.

To investigate the modulation behavior of the resonant current, an analytical approach is introduced to calculate the system response to the subharmonics of the source voltage in both time and frequency domains. The calculation indicates that when there is a mismatch between the power line frequency(f_0) and the resonant frequency of the magnet circuit(f_s), a modulation with frequency $i\Delta f$ occurs, where i is the

corresponding subharmonic order and $\Delta f = |f_s - f_0|$. Analysis in the frequency domain tells that the modulation appears as sidebands around the resonant output fundamental and its harmonics. It is concluded that a subharmonic of an order i produces spectrum in the resonant output as follows.

Sidebands of hf_s with frequencies of $hf_s \pm i\Delta f$, and the component with lower frequency at $i\Delta f$, where h is the order of the harmonics in the resonant output.

These calculations are well examined by experiment.

Further calculation shows that the modulation cannot be reduced either by raising the quality factor (Q) of the resonant network or by diminishing the mismatch frequency (Δf). This suggests that the basic way to suppress the modulation is only to attenuate the source voltage subharmonics, especially those of lower orders such as 50, 100 and 150 Hz components.

The analysis is performed based on Liou's approach on the switched linear network. The approach introduced can be used to compute the response to the source voltage input containing harmonics while any other existing method just deals with the harmonic-free one.

A feedback control system, including a source voltage loop, a filter voltage loop and an AC field loop, is implemented for achieving a highly-stable resonant current and magnetic field. In the source voltage loop, which is designed to reject the perturbations from the AC supply voltage, an improved regulator is proposed to reduce the influence of the subharmonics. Upon the conventional type regulator, a passband amplifier is introduced so that the rectifier subharmonics of 50, 150 and 100 Hz, which are the main causes of the modulation in the resonant output, can be reduced intentionally. Experiment leads to a highly-stable resonant current with a stability of $\pm 1.56 \times 10^{-4}$.

論文の審査結果の要旨

張鳳清氏の博士論文は、早い繰り返し周期で運転されるシンクロトロンを励磁する電源において、励磁周波数が商用電源周波数に近いとき、変調によって引き起こされる擾乱の発生原因の解明とその低減法に関する研究である。

この種の早い繰り返しによるシンクロトロンでは、種々の励磁方式が採用されている。本研究では、負荷である電磁石にキャパシタを並列接続した共振回路を構成し、励磁する方法について検討している。この共振法では、電源からは損失分のみパルスで供給されるため、外部に大きな無効電力を発生しない利点を持つ。しかしながら、励磁周波数が商用電源周波数に近いとき（本論分の場合50 Hz）、加速器として問題になる程度の変調電流が擾乱として励磁電流に重畳される。

これまで現象としては観測されていたが、その発生原因に関しては明確にされていなかった。張鳳清氏は、外部直流電源に交流周波の高調波分が重畳されることにより、共振系の周波数の商用周波数からの僅かなずれが変調電流の原因であることを見出し、回路理論を駆使した解析からその発生原因を明かにした。更に、多重のフィードバック系を用い、それによる変調電流の低減効果を実験的に確かめた。

変調による擾乱の発生原因を探るために、まず共振系の回路解析を行った。そこでは時間領域と周波数領域による解析を用い、励磁周波数と商用周波数が近い場合に励磁波形に変調がかかり、しかもサイドバンドとして高次調波が発生することを定量的に示した。次に、実際にシンクロトロン用電磁石と並列キャパシタとで共振系を作り、パルス電源による励磁試験を行い、変調電流を測定した。測定では、駆動パルスの周波数を変化させ、それによる変調度に対する依存性を調べた。実験結果は、解析による計算とほぼ30%の誤差の範囲で一致し、変調電流の発生原因が突き止められた。張鳳清氏の解析法を用いると、実験では検証が困難な変調電流のQ値依存性を知ることが可能であり、彼はQ値を大きくしても変調電流が減らないことを明かにした。更に、三重のフィードバックループを持つ制御系を用いて変調電流が低減できることを実験的に示した。特に、変調電流が大きいサイドバンドの周波数に合わせ、制御ループに帯域フィルターを入れることで、効果的に変調電流を低減できることを示した。

高速励磁のシンクロトロン用の共振型パルス励磁電源でしばしば見られる変調電流に関して、これまで発生原因が明確でなかった点を理論的ならびに実験的に解明した点で学術的に意義があり、独創的な研究である。更に、この手法は他への適用もできる点で発展性のあるものである。

以上の研究は、数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文としての内容に値し、更

に、実験手法、独自の解析手法ならびに独創的な提案と、専門的にも総合的にも極めて優秀な研究業績を上げていると判断した。

張鳳清氏に対し、学位論文に係わる専門分野及び基礎知識に関し口述による試験を実施した。これらに対して張鳳清氏は的確かつ明快に解答した。提出された論文の内容も、基礎的ならびに専門的な知識を基にして記述され、考察されている。また、関連学術雑誌への投稿が既にされており、学会等での発表も行っているので、語学、発表能力に関しても十分である。

以上により、審査委員会は張鳳清氏の論文内容、学識、語学力ともに博士（工学）を授与するのに値するものと判断した。