

RF-mätningar med hög precision för ESS kavitetsparametrar

Philip Jönsson

European Spallation Source, ESS, är ett multinationellt forskningscentrum som 17 länder bidrar till att bygga. Projektet startade 1998 då Organisationen för ekonomisk utveckling, OECD, beslutat att en högintensiv neutronkälla kommer att byggas i varje kontinent, det vill säga Nordamerika, Europa och Asien. Under de följande tio åren har projektet utarbetats och en plats för den europeiska anläggningen valdes, Lund i Sverige. Under de senaste fem åren har specifikationer och utformning av acceleratoren utvecklats för att hitta den optimala layouten i form av energiförbrukning och precision av strålen i acceleratoren, och hur målstationen ska utformas.[1]

Tanken med projektet är att, med hjälp av elektriska fält, accelerera protoner upp till nästan ljusets hastighet och sedan låta dem kollidera med en bit volfram. Efter kollisionen frigörs neutroner med hög energi från volframbiten i många riktningar. Sen bromsas neutronerna till ungefär ljudets hastighet och styrs in i olika experimentstationer. I dessa anläggningar undersöks olika materials egenskaper. Materialen består av allt från plaster och metaller till biomolekyler och arkeologiska prover.[1]

För att accelerera protonerna kommer man använda så kallade resonanskaviteter, vilket ungefär är en cylinder gjord i metall. En RF-puls, det vill säga en puls bestående av en oscillerande signal med en bestämd frekvens, amplitud och längd, skickas in i kaviteterna. När RF-pulsen sänds in i kaviteten skapas en stående våg som skapar ett elektriskt fält.[2] Acceleratoren är utformad så att det tar lika lång tid för protonerna att färdas från en kavitet till nästa som det tar för den stående vågen att växla från maximum till minimum i det elektriska fältet. När protonen kommer in i kaviteten känner den av det elektriska fältet och tar upp energi från det. Detta resulterar i att protonens hastighet ökar.

Det finns många utmaningar för reglering av kaviteter inom ESS. Detta orsakas bland annat av lång RF-puls, hög intensitet på protonstrålen, och osäkerheter i kaviteterna. ESS är den första stora acceleratoren att använda så kallade Spoke-kaviteter, vilket innebär att det inte finns så mycket erfarenhet av hur de fungerar. Detta skapar ett behov av en mer flexibel reglering, så att ändringar av inställningarna är lättare gjorda och oönskade konsekvenser kan undvikas. Det är ett krav med hög energieffektivitet på ESS, det vill säga energiförbrukningen ska vara så låg som möjligt.

För att ta itu med utmaningarna på ESS genomförs en omfattande undersökning av metoder och nya idéer som genomförts eller föreslås i andra labb. Dessa metoder/idéer blir möjliga på grund av framsteg inom modern teknik, korrekt systemmodellering och avancerade styrkoncept. Dessa möjliga förbättringar är avgörande för en bättre förståelse och därmed en bättre drift av ESS kaviteter. De är också beroende av mätningar med hög precision av kaviteternas grundläggande parametrar.

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur olika faktorer påverkar mätningar av kaviteternas parametrar och i sin tur hur styrningen påverkas. Nya mätmetoder kommer också att undersökas.

För att kunna undersöka effekten av dessa faktorer simuleras en kavitet och styrsystemet av den. Detta görs genom att sätta upp matematiska modeller i programmet MATLAB. Den matematiska modellen för en kavitet är en differentialekvation som tar hänsyn till spänningen, strömmen, bandbredden, kavitets kvalitetsfaktor och RF-pulsens avvikelse från resonansfrekvensen för kaviteten.[3] Avvikelsen beror på att det skapade elektriska fältet deformerar kaviteten vilket resulterar i att resonansfrekvensen för kaviteten ändras. Detta gör att den insända RF-pulsens frekvens inte längre är resonansfrekvensen och därmed blir det elektriska fältet

inte maximalt och då blir det energiförluster. Kvalitetsfaktorn är ett mått på hur bra kaviteten är på att hålla kvar energi.

För att hålla det elektriska fältet konstant under hela RF-pulsen användes tidigare återkoppling, vilket är en metod som jämför det nuvarande resultatet med det önskade och försöker kompensera så att det önskade resultatet uppnås. Denna metod kräver mycket energi. Eftersom ESS har som mål att bli så energisnålt som möjligt används även framkoppling, vilket är en metod där man startar ett test och utifrån resultatet bestämmer hur styrningen skall utföras, för att kompensera för den största delen av skillnaden mellan det önskade och det nuvarande resultatet. Detta behöver inte lika mycket energi som återkoppling. Det kräver dock att mätningarna på systemet är gjorda med hög precision annars kan systemet sluta fungera som det ska. Framkopplingen kommer dock inte kunna resultera i det önskade resultatet, men kommer nära. För att få det önskade resultatet används både återkoppling och framkoppling. För att få en bra framkoppling måste man mäta kavitaternas parametrar. Om det mätta värdet inte överensstämmer med verkligheten påverkar det slutresultatet. Vissa parametrar kan kompenseras för genom att ändra inparametrarna, medan andra inte är lika lätta att kompensera för eftersom de används för att beräkna inparametrar. Det är därför viktigt att dessa kan mätas noggrant.

Andra faktorer som påverkar resultatet är osäkerheter i mätinstrumenten. Dessa osäkerheter ligger bland annat i riktkopplaren. Riktkopplaren används för att mäta hur mycket av signalen som går igenom den och hur mycket som reflekteras tillbaka mot ursprunget. Riktkopplarens förmåga att göra skillnad på den genomgående och den reflekterade signalen kallas direktivitet. En annan osäkerhet finns i kopplingsfaktorn. För att inte påverka signalen så mycket mäts bara en fraktion av signalen och sedan förstärks den. Denna fraktion bestäms av kopplingsfaktorn och är den riktiga inte samma som den som används blir förstärkningen inte rätt.

De nya mätmetoderna som undersökts mäter kavitets kvalitetsfaktor och hur mycket RF-pulsen avviker från kavitets resonansfrekvens.[3] Metoden för att beräkna avvikelsen fungerar bra, den påverkas till och med mindre av direktiviteten än den tidigare använda metoden. Den påverkas dock mer av en felaktig kopplingsfaktor, men det är lättare att rätta till. För kvalitetsfaktorn fungerar den nya metoden, men inte lika bra som den tidigare använda. Den tidigare använda metoden ger samma resultat i alla fall av störningar.

Slutligen gjordes mätningar på en kavitets liknande de som kommer användas i den slutgiltiga acceleratoren. Det var i huvudsak kvalitetsfaktorn som undersöktes och om olika upplösning i mätdata har någon påverkan på resultatet. Resultatet var att mätningarna gav ungefär samma värde oavsett vilken upplösning det var.

Det finns en del parametrar som påverkar kavitetserna, men de flesta går att kompensera för så att det önskade resultatet nås. De andra skall mätas så noggrant som möjligt. Problemet är dock att det finns osäkerheter i mätinstrumenten som används. Den parameter som är svårast att mäta är skillnaden mellan kavitets resonansfrekvens och RF-pulsens frekvens. Mätmetoden som undersökts i detta examensarbete påverkas mindre av osäkerheter i mätinstrument än den tidigare använda metoden.

Referenser

- [1] S. Peggs (Ed.), Technical Design Report, April, 2013
- [2] R. Zeng, An Introduction to Cavity Control at ESS, ESS RF Workshop, Uppsala, 2013-12-04
- [3] T. Schilcher, Vector Sum Control of Pulsed Accelerating Fields in Lorentz Force Detuned Superconducting Cavities, University of Hamburg, 1998-04-27.
- [4] S. Michizono, D. Arakawa, S. Fukuda, E. Kako, H. Katagiri, T. Matsumoto, T. Miura, Y. Yano, "Performance of LLRF System at s1-global in KEK" in the Proceedings of IPAC2011, p. 451-453, San Sebastian, Spain, September, 2011