

고주파 유도가열 장치의 실시간 부하예측 기법에 관한 연구

박태준, 김태원, 이성희, 이진희, 한무호, 이왕하
포항산업과학연구원 (RIST)

Online Load Estimation Method of High Frequency Induction Heat System

Tae-Joon Park, Tae-Won Kim, Seung-hee Lee, Jin-hee Lee, Mu-ho Han, Hwang-Ha Lee
Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST)

ABSTRACT

본 논문은 고주파 유도가열 장치의 실시간 부하 예측 기법을 제안한다. 인버터 출력전압과 콘덴서 양단전압을 센싱하여 adaptive parameter estimation 기법을 이용하여 피가열체인 부하의 등가저항과 인덕턴스를 구한다. 제안된 방법을 이용하여 부하 발열량과 콘덴서 बैं크의 Q factor를 실시간 예측할 수 있다. 콘덴서 बैं크의 Q factor를 통해 부하 부담률을 알 수 있으므로 बैं크의 파손 등의 사고를 미연에 방지 할 수 있게 한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통해 확인하였고 모의실험장치에 적용하여 실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

유도가열이란 가열코일에 전류를 흘림으로 전자기 유도현상에 의해 피가열 금속판재의 표면으로 유도전류가 발생하고 I^2R 로 발열되는 것을 말한다. 본 논문은 LCL공진형 유도가열 장치에 있어서 피가열체 부하인 금속판재의 폭, 두께, 재질이 바뀔때 따라 변하게 되는 등가 인덕턴스와 등가 저항을 예측하기 위한 알고리즘에 관한 것이다. 금속의 폭과 두께, 재질이 바뀔때 따라 1차측 회로로 환산된 등가적인 저항 값이 바뀌게 된다. 따라서 발열되는 열량도 변하게 되고 공진회로의 Q-factor가 변화되어 공진회로의 유효 또는 무효전력도 변하게 된다.^[1,2] 이와 같은 상황을 모니터링 하기 위해서는 코일의 양단전압과 코일에 흐르는 전류를 측정해야 한다. 실제 가열코일의 전류를 측정하기 위한 CT(Current transducer)를 설치하기가 힘들고 매우 고가이다. 본 논문에서는 전류를 측정하기 위한 전류측정용 센서 없이 인버터 출력의 전압과 콘덴서 बैं크의 양단 전압의 2개의 전압을 측정해서 가열코일과 부하의 등가인 피턴스를 예측하는 보상 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 50kW급 유도가열 모의실험 장치에 적용하여 검증하였다.

2. 제안된 부하예측 알고리즘

2.1 LCL 공진회로의 Linear Parameterization

그림1은 유도가열 장치의 LCL 공진회로, 가열코일 및 부하 저항의 구성 회로를 나타낸 것이다. 콘덴서 양단 전압 V_{cap} 을 시스템 출력변수 y 로 잡고 인버터 출력전압 V_{inv} 을 입력변수 u

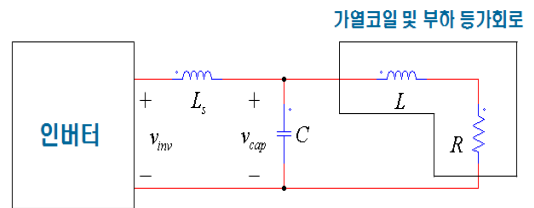


그림 1 유도가열 LCL 공진 필터 및 부하등가 회로

로 했을 때 입력력 전달함수를 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{y}{u} = \frac{\frac{1}{CL_s}s + \frac{R}{CLL_s}}{s^3 + \frac{R}{L}s^2 + \frac{1}{C}\left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L_s}\right)s + \frac{R}{CLL_s}} = \frac{bs + b0}{s^3 + a2s^2 + a1s + a0} \quad \text{식}$$

(1)

위식을 파라미터와 신호의 곱 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$y^{(3)} = \theta^T \begin{pmatrix} u^{(1)} & u & -y^{(2)} & -y^{(1)} & -y \end{pmatrix} \quad \text{식(2)}$$

여기서 파라미터 벡터는 $\theta^* = (b1, b0, a2, a1, a0)^T$ 이며, $u^{(1)}$ 은 입력 u 의 1차 미분을 $y^{(1)}$ 은 출력신호의 1차 미분을 나타낸 것이다. 미분항이 있으므로 식(2)에 Stable한 filter로 나누어 주면 식(3)과 같은 파라미터 θ 와 신호 ϕ 의 곱 형태의 Linear Parameterization을 만들 수 있다.

$$z = \theta^* T \phi \quad \text{식(3)}$$

$$\phi = \begin{pmatrix} (s, 1) \\ \Lambda(s) \end{pmatrix} u, - \begin{pmatrix} (s^2, s, 1) \\ \Lambda(s) \end{pmatrix} y \quad \text{식(4)}$$

여기서 $\Lambda(s) = s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0$ 는 Stable filter로 LHP에 pole이 위치하도록 설계된다. 식(3)에 대한 예측모델은 식(5)로 나타낼 수 있으며, normalized된 예측에러는 식(6)과 같다.

$$\hat{z} = \theta^T \phi \quad \text{식(5)}$$

$$e = \frac{z - \hat{z}}{m^2} \quad \text{where } m^2 = 1 + \phi^T \phi \quad \text{식(6)}$$

Instantaneous cost 함수를 식(7)과 같이 정의하고 cost를 최소화 시키는 알고리즘을 찾는다.

$$J(\theta) = \frac{e^2 m^2}{2} = \frac{(z - \theta^T \phi)^2}{2m^2} \quad \text{식}$$

(7)일반적으로 가장 많이 쓰이는 Gradient update rule을 적용하면 θ 의 미분은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\theta} = -\Gamma \nabla J(\theta) = \Gamma e \phi \quad \text{식(8)}$$

여기서 Γ 는 update 상수이며, $J(\theta)$ 의 Gradient는 다음 식으로

구할 수 있다.

$$\nabla J(\theta) = -\frac{(z - \theta^T \phi)\phi}{m^2} = -e\phi \quad \text{식}$$

(9)식(8)을 Discrete time 형태를 나타내면 다음 식과 같이 되고, n+1 샘플에서의 파라미터 값을 예측 할 수 있다.

$$\theta(n+1) = \theta(n) + T \cdot Te\phi \quad \text{식}$$

(10)여기서 T는 sampling time이다.

2.2 부하 L과 R 예측 방법

식(1)의 전달함수에서 콘덴서 बैं크의 C값과 Ls값을 미리 알고 있다고 가정하면 부하 L과 R은 식(1)과 식(10)의 파라미터로부터 얻을 수 있다.

$$L = \frac{1}{(a1 - b1) \times C}, \quad R = a2 \times L \quad \text{식}$$

(11)

콘덴서 बैं크 C값과 인버터 직렬 리액터 Ls값은 주머지 사양과 간단한 측정을 통해 실험적으로 알 수 있다. 즉, 식(1)에서 C와 Ls로부터 b1 파라미터는 구할 수 있고 남은 미지의 파라미터는 a2, a1이다. PE(Persistence Excitation) 조건에 의하면 입력에 주파수 성분 1개만 있으면 미지의 2개의 파라미터를 추종할 수 있다.^[3] 인버터 출력전압 V_{inv} 은 PWM형태의 구형파이며 미지의 파라미터를 추종하기에 충분한 PE 조건을 만족함을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

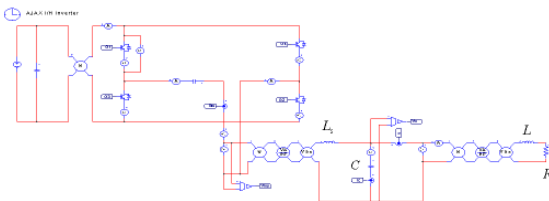


그림 2 LCL공진형 유도가열 시스템의 PSIM 모델

본 논문에서 제안된 유도가열 부하예측 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 PSIM tool을 이용해서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 모델은 그림2와 같고 회로에 사용된 각종 파라미터들은 아래와 같다.

- 1) 콘덴서 बैं크 C : 21.25 uF
- 2) 인버터 출력 Ls : 1.79 uH
- 3) 부하 L : 0.529 uH, R : 6 mΩ

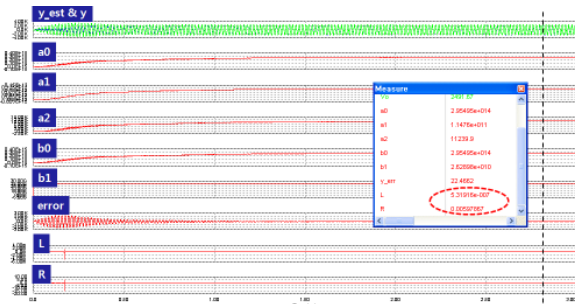


그림 3 제안된 부하 예측알고리즘 적용 시뮬레이션 결과

그림3은 제안하는 부하예측 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 각종 파라미터가 일정한 값으로 수렴하고 식(11)을 통해 부하 L과 R을 계산하면 L값은 0.53uH로 추종하고 R은 5.97 mΩ으로 추종됨을 볼 수 있다. 그림 5는 실제 50kW급 모의실험장치를 구성하여 테스트한 결과를 나타낸 것이다. 그림5의 (b) 상단은 오실로스코프로 관측한 실제 인버터 출력파형과 콘덴서 बैं크 양단전압을 나타낸 것이다. (b)하단은 a2, a1 파라미터의 실제 값으로 수렴 함을 보여준다.

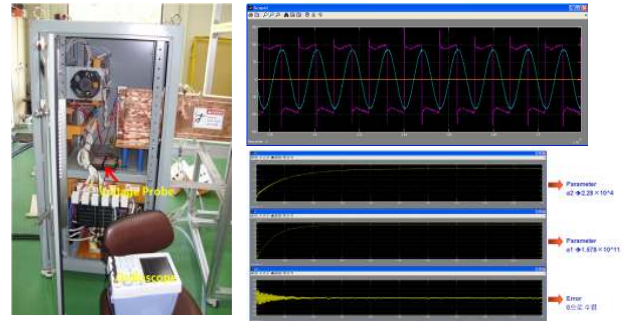


그림 4 50kW급 모의실험장치를 통한 제안된 알고리즘의 검증

4. 결론

본 논문은 LCL공진형 고주파 유도가열 시스템의 부하예측 알고리즘에 관한 것으로 인버터 출력전압과 콘덴서 बैं크 양단전압의 측정만으로 부하의 인덕터 L과 저항 R을 실시간으로 예측 할 수 있게 한다. 부하를 예측함으로써 얻을 수 있는 이점은 다음과 같다.

첫째, 판개의 끊김과 같은 갑작스러운 부하의 변동을 감지함으로써 인버터에서의 과전류 발생이나 설비의 고장을 예방할 수 있다.

둘째, 부하의 발열량을 예측함으로써 입력투입 적절량을 조절할 수 있다.

셋째, 현 장비의 가열효율을 계산할 수 있다. 입력투입 전력량 대비 발열량의 비로써 가열효율을 알 수 있다.

넷째, Q-factor를 계산해서 콘덴서 내마진 용량이 적절한지를 판단할 수 있다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 우수성과 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] S.Dieckerhoff, M.J.Ruan, R.W.De Doncker, "Design of an IGBT-based LCL-resonant Inverter for High-frequency Induction Heating", Industry Applications Conference, vol.3, pp.2039-2045, 1999
- [2] C.J.Erickson, "Handbook of Electrical Heating for Industry", IEEE Press.
- [3] P.A.Ioannou, J.Sun, "Robust Adaptive Control", Prentice Hall.