

Railway Micro Grid에서 발생하는 문제 규명을 위한 시뮬레이터 개발에 관한 연구

A Study on The Simulator Development for Identifying Potential Problems in Micro Grid Applied to Railway System

이병복*, 이종우*[†]

Byungbok Lee*, Jongwoo Lee*[†]

Abstract Micro grid system is island power systems which consist of photovoltaic, wind turbine, fuel cell, which are generating and distribution systems. Micro grid generally has two types of operation modes, one is island and the other connected to major grid. Photovoltaic, wind turbine can produce harmonics, transient, flicker, frequency, unbalance, voltage irregularity because of power generating intermittently. We modeled micro grid to simulate photovoltaic, windmill and fuel cell, put a load model to produce the characteristics which include harmonics, transient, flicker, frequency and voltage variation. Each simulation nodes put oscilloscope to show the characteristics.

Keywords : Micro grid, reactive power, active power, synchronization, frequency, voltage

초 록 Micro grid 시스템은 소규모 전력 망으로서, Photovoltaic, windmill, fuel cell 등으로 구성되어, 발전 및 배전 망으로 구성되어 있다. Micro grid에서도 photovoltaic, windmill 등과 같이 간헐적인 전력 생산과 부하의 변동에 의해서 harmonics, transient, flicker, frequency, unbalance, voltage 등에 기인한 전력 품질 문제가 발생되고 있다. Micro grid의 전력 품질 문제를 연구하기 위해서 mirco grid를 묘사할 수 있도록 simulink를 이용하여, photovoltaic, windmill, fuel cell 모델링을 하고, harmonics, transient, flicker, frequency, unbalance, voltage의 특성 변동을 묘사할 수 있도록 부하를 설정하였으며, 특정 노드에서 전력 특성을 검지할 수 있도록 scope를 설치하여 각 특성을 규명할 수 있는 시뮬레이터를 제시하였다.

주요어 : 마이크로 망, 무효전력, 유효전력, 주파수, 전압, 망연결, 망분리

1. 서 론

전기에너지 생산은 석유, 석탄 및 원자력에 의해서 대부분 생산되고 있으며, 전기에너지 수요는 계속 증가하고 있다. 석유, 석탄 및 원자력 에너지는 한정된 에너지이며 한정된 자원으로, 점진적으로 고갈되어 가고 있다. 전기 생산에 새로운 에너지원으로 태양광 발전, 풍력발전, 조력발전, 바이오에너지, 연료 전지 등 대체 에너지 개발이 진행되고 있으며,

[†] 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과
(saganlee@seoultech.ac.kr)

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과

이러한 시스템을 신 재생 에너지 시스템이라 칭한다. 태양광 발전은 낮 동안에만 발전이 가능하며, 일기 상태에 따라 에너지 생산량이 달라진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 저장 장치를 설치하여, 필요 시에 전력 에너지를 다시 사용할 수 있도록 한다.

신 재생 에너지 시스템에서 생산된 전력을 직접 생산자가 사용할 수 있으나, 대부분 생산자는 전력 생산과 소비의 평형을 맞출 수 없기 때문에 불균형이 발생한다. 이 불균형은 신 재생 에너지 생산 시스템을 전력 망에 연결하여 해결할 수 있다. 신 재생 에너지 시스템에서 전력 생산은 태양광 전지, 연료 전지 및 배터리를 사용하여 직류 형태로 생산을 하고, 풍력 발전은 교류로 생산을 한다. 인버터를 이용하여 직류에서 교류 변환과 풍력 발전과 같이 생산된 교류는 micro grid와 같은 전력 망에 연결하기 위해서 전력 품질 문제를 해결해야 한다. 이와 같은 분산 발전 시스템은 전력 품질, 망 안정도 및 망 부하 등 분야에서 여러 가지 문제를 발생한다.

각각의 분산 전원은 망 연결에 각각의 문제를 가지고 있다. 태양광 발전과 풍력 발전은 간헐적이고, 예측 불가능한 발전을 하기 때문에, 전압과 주파수에 대한 안정성 문제를 일으킨다. 이러한 전압 문제는 부하 탭 변환기와 같은 기계적인 망 장치에 영향을 미쳐, 자주 동작이 되어 마모가 다른 장치보다 쉽게 된다. 태양광 발전이 많을 때에는 저장 장치가 필요하고, 일몰 시에 전력 회사는 태양광 발전을 대체할 수 있도록 해야 한다. 이러한 급격한 변동은 망 운영자에게 커다란 문제가 된다. 따라서 마이크로 망에서 형태, 구조, 계획 및 구성 등에 대한 연구가 필요하다.

마이크로 망 제어는 독립적으로 운용할 수 있어야 하며, 부하의 동적 변동에 대처할 수 있도록 새로운 전원을 망에 신속하고 중단이 없는 상태로 연결하거나 분리할 수 있어야 한다. 마이크로 망 운용을 하기 위해서 국가 망과 연결은 필수적이다. 마이크로 망의 전력 생산이 과잉일 경우는 국가 망에 송출을 해야 하고, 부족할 경우에는 수전을 받아야 한다. 마이크로 망과 국가 망과의 연결을 위해서는 전압과 주파수를 일치시켜야 하며, 공급과 수요의 균형을 맞추어야 하고, 전력 품질을 보장해야 한다.

본 논문에서는 마이크로 망의 분리 망과 연결 망에 대한 문제점을 도출하고 해결 방안을 제시하였다. 2장에서서는 마이크로 망 운용, 3장에서는 마이크로 망과 국가 망과 연결 시에 발생하는 문제에 대해서 논 하였으며, 4장에서는 시뮬레이션 모델을 제시하였으며, 5장에 결론을 도출하였다.

2. 마이크로 망 운전(Micro-source Operation)

2.1 마이크로 망의 운용기능

마이크로 망의 운용은 망을 외부와 완전히 분리하여 운전하는 분리 망 운전과 마이크로 망을 국가 망과 연결하여 운전하는 2가지 방법이 있다. 마이크로 망은 유효전력과 무효전력을 국가 망에 송출하거나 혹은 수신할 수 있어야 하며, 과도기 동안에 전력 평형을 유지하기 위해서는 에너지 저장장치를 갖추어야 한다.

정전 후에, 마이크로 망은 구체적 주파수와 진폭 조건을 자체에 부가하여 정확하게 동작해야 하고, 계층적 순서에 따라 부하와 DB가 연결되어야 한다. 비슷하게 이러한 모드로 모든 미소전원(DG: Distributed Generator)은 사전에 설정된 전력을 생산해야 하며, 국가 망으로부터 최소한의 전력을 수전해야 한다. 부가적으로 각각의 미소전 원은 커뮤니케이션 버스를 통하여 유효 전력과 무효 전력에 대해서 전압 조정을 통하여 제어할 수 있어야 한다. 일반적으로 사용자의 요구에 따라, 국가 망에 연결된 마이크로 망은 국가 망과 함께 부하에 전력을 보낼 수 있어야 한다.

마이크로 망 기술은 유효/무효전력 제어 및 전력품질 보상, 원격 제어 및 감시기능, 계통연계/단독운전을 제어하는 PCS(Power Conditioning System), 계통의 보호를 위한 STS/IED(Static Transfer Switch/Intelligent Electronic Device), 그리고 에너지의 생산과 경제적 급전을 제어하는 장치인 EMS(Energy Management System) 등으로 구성된다.

2.2 마이크로 망의 분리와 연결 시 발생문제

분리 망 모드에서 시스템 동적 작용은 각자의 미소전원에 의해서 묘사되어야 하며, 이것은 정상적으로 마이크로 망에서 주파수와 전압크기를 조정하여 정격 주파수와 전압에서의 이탈을 검지해야 한다. 이 결과로, 미소전원은 주파수 변동에 비례해서 유효전력을 흡수하거나 방출하는 것을 수행하여야 한다. 주요 망에서는 분리된 상태로 운용되기 위해서 국가 망에서 마이크로 망을 분리시켜야 한다. 따라서, 마이크로 망이 분리 망으로 운용될 때, 시스템에 전력을 공급하는 미소전원들은 부하를 공동으로 부담하고, 정상 전압과 주파수 안정에 책임이 있다. 인버터가 과 부하가 걸리는 것을 피하는 것과 부하 변동을 적정한 형태로 제어하는 것이 중요하다.

2.3 마이크로 망의 계층 제어 종류

마이크로 망을 제어하기 위해서 4개의 계층적 구조를 갖는다. 계층 “0”은 전압과 전류, feedback 및 feedforward, 선형 및 비선형 제어루프가 출력전압을 제어하고, 시스템 안정성을 유지하기 위해서 전류를 제어한다. 계층 “1”은 물리적 출력 임피던스를 나타내기 위해서 가상 임피던스 제어루프를 포함하고 있으며, 시스템 안정성과 감쇄를 만들고, 물리적 현상을 묘사하여 이 계층에서 사용된다. 계층 “2”는 마이크로 망에 연결될 수 있도록 값을 설정한다. 이 계층에서 마이크로 망 혹은 국가 망과 매끄럽게 연결과 분리를 하는 동기화를 제어한다. 계층 “3”은 국가 망과 마이크로 망 사이에 파워흐름을 제어한다.

보통 전력 시스템에서는 높은 관성을 갖는 동기발전기와 유도성 망을 갖는다. 전력전자를 이용한 마이크로 망에서는 관성이 없고, 망 특성은 저항분이다. 두 시스템은 커다란 차이를 갖고 있으며, 제어 시스템을 설계 시에 고려를 해야 한다. AC 마이크로 망을 제어하기 위해서 계통연계운전 및 분리 운전, 주파수와 전압 및 유효전력 및 무효전력을 제어해야 한다. 제어 3 단계 제어를 많이 도입한다. 마이크로 망은 국가 망과의 연결과, 분리 망으로 운용할 때의 특성이 다르므로 계층 “1”과 “2”을 적절하게 조합을 하여 운용을 하여야 한다. 3장에서는 마이크로 망 운용에 필요한 제어에 대해서 언급한다.

3. 마이크로 망의 제어

3.1 마이크로망의 운전

마이크로 망을 부하 변동에 따라 자동적으로 운전이 가능해야 하며, 자동모드에서는 전압 및 주파수 관리, 공급과 소비의 평형 및 전력품질에 대한 문제를 만족해야 한다. 전압 및 주파수 관리 시스템은 전압원으로 동작을 해야 하며, 허용한계 내에서 기준 값에 따라 조정되고 전압과 주파수 제어 루프 통하여 전력흐름을 제어하여야 한다. 공급과 소비의 평형은 망 연결 모드에서, 미소전원의 주파수는 망 주파수에 의해서 결정된다. 설정 주파수가 변동되면, 국가 망과 마이크로 망 사이의 전력 각이 변경되므로 새로운 유효전력 설정 점을 찾아야 한다. 전력품질은 2단계를 통하여 결정된다. 첫 번째 단계는 마이크로 망 내에서 무효전력 보상과 고조파전류 분배이다. 두 번째 단계는 PCC에서 무효전력과 고조파 보상이며, 마이크로 망은 국가 망의 전력 품질을 지원해야 한다. 마이크로 망이 분리 망모드로 운용될 때, 모든 DG 유닛은 사용 망 쪽으로 필요한 전력을 송출할 수 있는 일정 전력원이 되어야 한다.

3.1.1 전압 대 무효전력 처짐(Voltage vs. Reactive Power Droop)

많은 미소전원을 마이크로 망에 연결하여 기본적인 단일 파워 팩터를 제어하는 것은 불가능하다. 전압조정은 국소 신뢰성과 안정성 확보에 필요하며, 전압제어 없이, 많은 미소전원이 유입되는 시스템은 전압 및/혹은 무효전력의 진동을 일으킬 수 있다. 전압제어는 미소전원 간에 대규모 순환 무효전력을 억제한다. 전압설정 점들에서 작은 에러에 의해서, 순환전류가 미소전원의 등급을 초과할 수 있다. 이러한 상황은 전압 대 무효전력의 처짐(조락:凋落)제어(droop control)를 필요로 하게 되고, 미소전원에 의해서 생성된 무효전력이 용량성(진상)이 됨에 따라, 국소전압 설정 점을 낮출 수 있다. 반대로, 무효전력이 유도성(지상)이 되면, 전압설정 점은 높아진다.

3.1.2 유효전력 대 전압 처짐(Power vs. Frequency Droop)

분리 모드에서, 각각의 인버터에서 주파수 생성에서 발생하는 작은 에러에서 기인된 문제들과 부하변동에 따른 전력 운용점 변경 필요에 대응할 수 있어야 하며, 각 미소전원에서 전력 대 주파수 저감에 대해서 통신 없이 해결할 수 있어야 한다. 국가 망이 전압저하, 고장, 정전 등과 같은 상태가 될 때, 마이크로 망은 충격 없이 자동적으로 분리망 모드로 전환할 수 있어야 한다. 마이크로 망이 국가 망으로부터 분리될 때, 국소 주파수의 피상적 감소로 이어질 수 있는 경우를 대비해서 미소 망에서 각각 미소전원의 전압 위상각을 변동시킨다. 부하증가와 관련된 주파수 감소에 대해서, 미소전원이 전력에 비례에 따라 전력을 제공할 수 있도록 한다.

3.1.3 처짐제어(Droop control)

컨버터 사이에 순환전류를 피하기 위해서, 컨버터 간에 특별한 통신 없이 처짐제어가 적용된다. 처짐 속도제어는 전력 망에 연결된 동기 발전기를 운전하는 원동기의 속도제어 모드이다. 이 모드는 동기 발전기를 병렬운전이 가능하게 하여, 파워등급에 따라 발전량을 나눌 수 있도록 한다.

병렬 인버터 경우에서, 처짐방법은 가상 관성을 모사하여 각 모듈의 주파수와 진폭에서 출력 평균의 유효전력과 무효전력의 비례부분을 감하는 것으로 구성된다. 이 제어루프에서

$P-\omega$ 와 $Q-E$ 의 처짐이라 불리는 제어루프에서 상호제어를 피하고, 양질의 전력분배를 하기 위해서 UPS에 병렬로 연결된 인버터를 제어하는데 사용한다. 이 방법은 상당한 신뢰성과 유연성을 갖고 있다.

3.2 계층제어 종류

보통 전력 시스템에서는 높은 관성을 갖는 동기발전기와 유도성 망을 갖는다. 전력전자를 이용한 마이크로 망에서는 관성이 없고, 망 특성은 저항분이다. 두 시스템은 커다란 차이를 갖고 있으며, 제어 시스템을 설계 시에 고려를 해야 한다. AC 마이크로 망을 제어하기 위해서 3 단계 제어를 많이 도입한다.

미소전원과 마이크로 망과의 연결은 필수이다. 이 연결의 최종단계는 DC/AC 컨버터이며, 전류원 인버터이며, 망과 동기화를 유지하기 위해서 내부 전류루프와 PLL(Phase Locked Loop) 제어로 구성되어 있다. 망에 전류를 보내기 위해서는 전류형 인버터가 사용되고, 전압을 안정시키기 위해서 전압형 인버터를 사용한다. 전류형 인버터는 동기화를 위한 참조 값이 필요하지 않고, 분산 미소 발전기의 계통연계유지 능력과 전력품질 개선을 할 수 있다. 전류형 인버터가 외부 망과 연결하여 사용할 때, 전압형 에서 전류형 전원을 특성이 변경된다.

마이크로 망에서 전류형과 전압형이 동시에 사용될 때, 전압형은 에너지 저장장치에 연결되어, 주파수와 전압 안정화 사용된다. 전류형은 풍력발전에서 최대전력 점을 추적 하기 위해서 사용된다.

3.2.1 계층 “1”의 내부제어 루프

2개 이상의 전압형 인버터를 연결하여 사용할 때, 순환 유효전력 및 무효전력이 발생한다. 계층 “1” 제어에서는 내부 전류 및 전압제어 루프에 제공하는 전압의 크기와 주파수를 조정한다. 이 제어 기본방법은 동기발전기의 특성을 모방하는 것이며, 유효전력이 증가할 때, 주파수를 낮추는 것이다.

각각의 미소전원이 “plug and play” 를 하기 위해서는 “유효전력 대 전압 ($P-\omega$)” 과 “무효전력 대 전압($Q-E$)” 의 처짐제어를 이용해서 미소전원의 터미널 전압을 제어하는 것이다. 이 방법은 선 임피던스 ($Z=R+jX$)에 의해서 분리된 두 노드 사이에 유효전력과 무효 전력 흐름을 이용한다.

$$P = \frac{E_1}{R^2 + X^2} (R(E_1 - E_2 \cos \delta) + XE_2 \sin \delta) \quad (1)$$

$$Q = \frac{E_1}{R^2 + X^2} (-RE_2 \sin \delta + X(E_1 - E_2 \cos \delta)) \quad (2)$$

단 E_1 와 E_2 는 두 전압의 진폭이고 δ 는 두 전압 사이의 위상이다. 유도성 선 임피던스에서

는 선저항(R)은 무시될 수 있으며, 위상각 δ 은 일반적으로 작아 $\sin(\delta)=\delta$ 및 $\cos(\delta)=1$ 이다.

유효전압의 흐름은 위상각 δ 에 비례하고, 무효전력은 $(E_1 - E_2)$ 에 비례해서 흐른다. 따라서 미소전원의 유효전력은 미소전원의 주파수를 변화시켜 조정할 수 있고, 무효전력은 미소전원의 전압을 조정하여 조정할 수 있다. 이러한 개념은 국가 망에 연결하거나, 분리할 때도 적용할 수 있다.

이 원리는 P/Q 처짐방법으로 알려진 것을 이용하여 전압형 인버터에 삽입한다.

$$\omega = \omega^* - G_P(\omega, P) \cdot (P - P^*) \quad (3)$$

$$E = E^* - G_Q(E, Q) \cdot (Q - Q^*) \quad (4)$$

ω 와 E 는 주파수와 출력전압의 진폭이고, ω^* 와 E^* 는 참조 값이고, P 와 Q 는 유효전력과 무효전력이고 P^* 와 Q^* 는 참조 값이다. $G_P(\omega, P)$ 와 $G_Q(E, Q)$ 는 해당되는 전달함수이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_P(\omega, P) = \frac{\omega^* - \omega_{\min}}{P_i^* - P_{i_max}} \quad (5)$$

$$G_Q(E, Q) = \frac{E^* - E_{\min}}{Q_i^* - Q_{i_max}} \quad (6)$$

3.3 분리 망 제어

주로 유도성 선 임피던스 갖는 전력망에서, 일반적인 유효 및 무효전력 제어는 낮은 전압 망에 연결할 때 많은 문제가 발생되며, 모선은 유도성이 아니어야 하며, 저항성분 R 을 무시해서도 안 된다. 이 경우는 망 쪽의 인덕터 혹은 변압기가 없어 출력 인덕턴스가 작은 경우에 미소전원 유니트에도 그대로 적용된다. 위상각 혹은 전압 진폭의 변화는 유효전력과 무효전력 흐름에 영향을 미치게 되며, 식(1)과 식(2)에서 나타내었다. 기존의 $(P - \omega)$ 와 $(Q - E)$ 의 처짐 방법으로 전력의 흐름을 제어할 경우, 과도시기에 유효전력과 무효전력 사이에 커플링이 발생하게 된다.

이러한 $P-Q$ 커플링을 피하기 위해서, 가상 유효전력과 무효전력을 활용하며, 선 임피던스 각 정보를 가지고 프레임변환을 통하여 유효전력과 무효전력을 분리한다. 망에 연결된 모드에서 파워제어의 유효성에 의해서, 이 방법은 분리된 운용모드에서 미소전원 사이에 실제적인 유효전력과 무효전력을 직접적으로 공유할 수 없다. 직접제어 방법에서 유효전력과 무효전력을 분리하는 방법으로 가상 전압과 주파수 프레임을 채용하는 것이다. 이러한 프레임 변환 방법들은 불평형 임피던스 전압강하 문제가 발생한다. 비슷한 방법으로 높은 X/R 비를 갖는 기존 전력 망에서 분리된 유효 및 무효전력을 제어하기 위한 한 가지 방법은 선 임피던스 정보가 필요 없는 가장 우세한 유도성 임피던스가 채용된 가상 출력 인덕터를 갖는 인버터에 연결하여 미소전원을 제어하는 것이다.

4. 시뮬레이션

앞 절에서 언급한 미소전원을 구현하기 위해서 시뮬링크를 이용하여, Figure 1과 같이 나타내었다. 마이크로 망을 구현하기 위해서, 연료전지, 태양광 발전 및 풍력 발전을 연결하였다. 부하는 고정부하와 동적특성을 갖는 부하를 연결하였다. 동적특성을 갖는 부하의 특성은 [0.1, 0.8, 0.2, 0.6]으로 설정하였다. 미소전원의 투입은 fuel cell 0.5초, 태양광 발전 0.8초, 풍력발전 1.1초에 투입하였다. 동특성의 결과는 Figure 2에, 유효전력과 무효전력에 대한 결과는 Fig 3에 나타내었다.

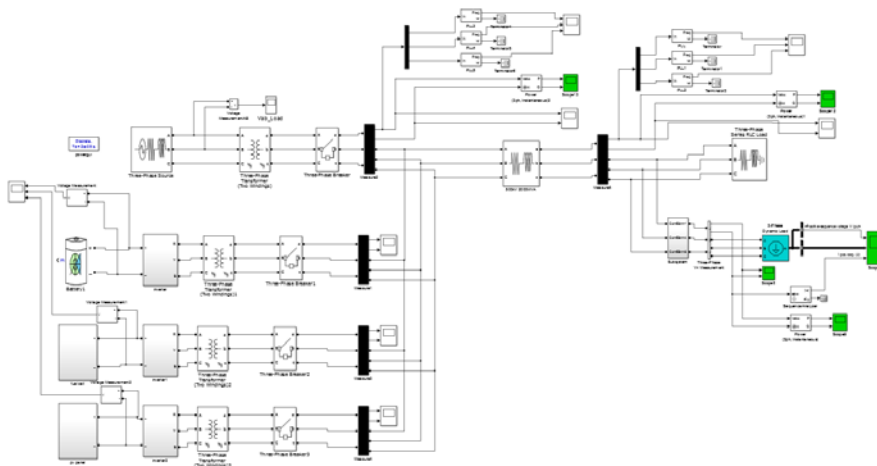


Fig. 1 Smart Grid Example

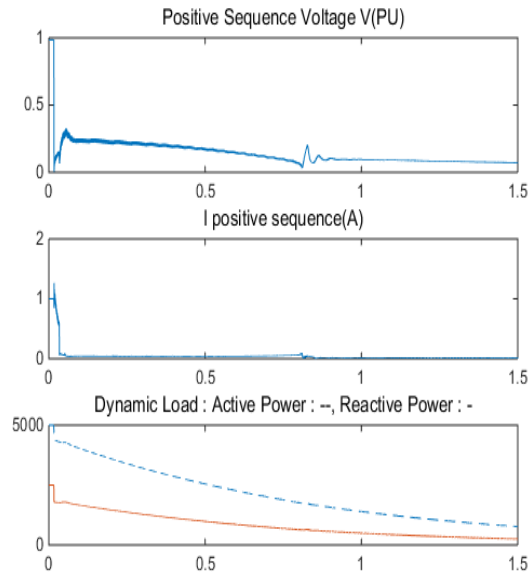


Fig. 2 Dynamic Load Variation

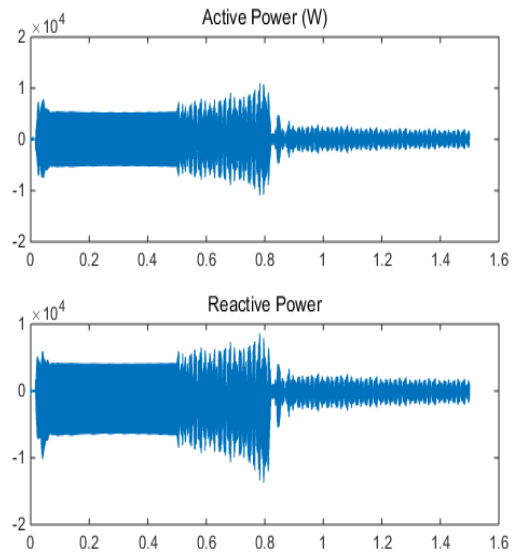


Fig. 3 Active and Reactive Power

5. 결론

미소전원을 투입하기 위해서는 주파수와 전압을 일치시켜야만, 마이크로 망에서 무효전력의 순환이 발생하지 않는다. 국가망과의 연결 혹은 분리 망으로 운용하기 위해서는 3단계 제어가 필요하다.

참고문헌

- [1] Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez, José Matas, Luis García de Vicuña, and Miguel Castilla (2011) *Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization*, 58(1), pp. 158-172.
- [2] Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero, Jaume Miret, Miguel Castilla, and Luis Garcia De Vicuna (2010) *Hierarchical Control of Intelligent Microgrids*, pp. 23-29.
- [3] Yun Wei Li and Ching-Nan Kao (2009) *An Accurate Power Control Strategy for Inverter Based Distributed Generation Units Operating In a Low Voltage Microgrid*, 24(12), pp. 2977-2988.
- [4] Brian K. Perera, Phil Ciuffo and Sarath Perera (2013) *Point of common coupling (PCC) voltage control of a grid-connected solar photovoltaic (PV) system*, pp. 7475-7480.
- [5] Qiang Fu, Adel Nasiri, Ashishkumar Solanki, Abedalsalam Bani-Ahmed, Luke weber and vijay Bhavaraju (2015) *Microgrids: Architectures, Controls, Protection, and Demonstration*, 43(12),pp. 1453-1465.
- [6] Working Group J-5 of the Rotating Machinery Subcommittee, Power System Relay Committee (2007) *Coordination Of Generator Protection With Generator Excitation Control And Generator Capability* , pp 1-17
- [7] Vikash Kuma and Pankaj Rai (2014) *Active Power and Frequency Analysis Of A Smart Grid Using Matlab/Simulink Approach*, 3(9), pp 1-6
- [8] A. B. Cultura II and Z. M. Salameh(2011) *Modeling and Simulation of a Wind Turbine-Generator System*, pp 1-7
- [9] N.Pandiarajan and Ranganath Muthu (2011) *Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink*, pp 314-319